

BACHELORARBEIT

**Simulationsstudie zur Prozessoptimierung
im Rahmen der Einführung von
Lean-Production-Konzepten**

bearbeitet von: Daniel Welschhoff

Studiengang: Bachelor Maschinenbau
Matrikel-Nr.: 123529

Ausgegeben am: 10.03.2016
Eingereicht am: 02.06.2016

Prüfer: Prof. Dr.-Ing Markus Rabe

Betreuer: Dipl.-Geoinf. Maik Deininger

Inhaltsverzeichnis

Simulationsstudie zur Prozessoptimierung im Rahmen der Einführung von Lean-Production-Konzepten

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung.....	1
2 Lean-Production-Konzepte zur Durchlaufzeitverkürzung und Bestandsreduktion	3
2.1 Das Pull-Prinzip	4
2.2 Heijunka (Produktionsnivellierung).....	6
2.3 Kontinuierlicher Produktionsfluss.....	8
2.4 Kaizen.....	10
2.5 Total Productive Maintenance	11
2.6 Jidoka (Autonomation).....	12
3 Ereignisdiskrete Simulation als Werkzeug der Prozessanalyse	14
3.1 Die Bedeutung von ereignisdiskreter Simulation für Produktionsprozesse und Materialflusskonzepte	14
3.2 Verifikation und Validierung als Bestandteil von Simulationsstudien	16
3.3 Simulationsvorgehensmodelle und ihre Strukturen	17
3.4 Das Simulationsvorgehensmodell nach ASIM	21
3.5 Vorgehensweise der Verifikation und Validierung nach Rabe et al. 2008	23
4 Maßnahmen und Verbesserungspotentiale der Elektronikfertigung des Pumpenherstellers unter besonderer Berücksichtigung der Lean-Production-Konzepte	27
4.1 Das aktuelle Produktionssystem.....	27
4.2 Abgeleitete Maßnahmen und Verbesserungspotenziale unter besonderer Berücksichtigung der Lean-Production-Konzepte	34

5	Entwicklung des neuen Lötprozesses	38
5.1	Ist-Analyse des Prozesses	38
5.2	Die Arbeitsplätze der Linien	41
5.3	Restriktionen	45
5.4	Das Layout der Anlagen	49
6	Simulationsgestützte Analyse des Lötprozesses	50
6.1	Zielbeschreibung der Studie	50
6.2	Aufgabenspezifikation	52
6.3	Konzeptmodell	55
6.4	Rohdaten	58
6.5	Aufbereitete Daten	62
6.6	Ausführbares Modell	65
6.7	Experimente und Ergebnisse	74
7	Zusammenfassung und Ausblick	83
8	Literaturverzeichnis	85
	Anhang	I

Abkürzungsverzeichnis

ITPL	Fachgebiet für IT in Produktion und Logistik
WLA	Wellenlötanlagen
Toyota	Toyota Motor Corporation
TPS	Toyota-Produktionssystem
3M's	Muda, Muri, Mura
OPF	One-piece-flow
JIT	Just-in-time
JIS	Just-in-sequenz
TPM	Total Productive Maintenance
V&V	Verifikation und Validierung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
et al.	et alii (lat. „und andere“)
SMD	Surface-mounted device
SMT	Surface-mount technology
THT	Through-hole technology
FIFO	First In – First Out
ICT	In-Circuit-Test/ In-Circuit-Tester
PPC	Production Planing and Controlling
ERP	Enterprise-Ressource-Planing
MES	Manufacturing Execution System
RFID	Radio Frequency Identification

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Kanban-Karte von Toyota [Ohno 2009, S.62]	5
Abbildung 2-2: Kanban-Regelkreis mit Material- und Informationsfluss [Brunner 2014, S.106].....	5
Abbildung 2-3: Die Verschmelzung von Muda, Mura, Muri [Liker: Toyota Way 2004, S.115].....	8
Abbildung 2-4: Just-in-sequence-Anlieferung [Dickmann et al. 2015, S.17]	9
Abbildung 2-5: Die wörtliche Übersetzung von Kaizen [Brunner 2014, S.11]	10
Abbildung 2-6: Gemba-Kaizen [Dickmann et al. 2015, S.26]	11
Abbildung 2-7: Die drei Säulen der TPM [Brunner 2014, S.78].....	12
Abbildung 3-1: Einsatzfelder der simulationsgestützten Optimierung [März et al. 2011, S.4].....	16
Abbildung 3-2: Simulationsvorgehensmodell (nach Sargent 1982) [Rabe et al. 2008,S. 31].....	18
Abbildung 3-3: Simulationsvorgehensmodell (nach Balci 1989) [Rabe et al. 2008, S. 30].....	19
Abbildung 3-4: Simulationsvorgehensmodell (nach VDI 2008) [Rabe et al. 2008, S. 32].....	20
Abbildung 3-5: Vorgehensmodell Simulation nach ASIM [Rabe et al. 2008, S.5]	22
Abbildung 3-6: Vorgehensmodell zur V&V für die Simulation in Produktion und Logistik nach Rabe et al. 2008 [S.119].....	24
Abbildung 4-1: Organigramm der innerbetrieblichen Logistik [firmeninterne Darstellung].....	28
Abbildung 4-2: Schneidemaschine der Bauteilvorbereitung [firmeninterne Fotografie].....	29
Abbildung 4-3: Leiterplatte mit eingraviertem Datamatrix-Code [firmeninterne Fotografie]	30
Abbildung 4-4: SMT-Bestückautomaten mit Feedern [firmeninterne Fotografie]	31
Abbildung 4-5: Sägeeinrichtung zum Trennen von Leiterplattennutzen [firmeninterne Fotografie]	32
Abbildung 4-6: Leiterplatten in einem Lötrahmen bei der THT-Bestückung [firmeninterne Fotografie]	33
Abbildung 4-7: Wellenlötanlage der Firma Ersä [firmeninterne Fotografie].....	34
Abbildung 5-1: Lötanlage 1 mit Fertigungszellen	39
Abbildung 5-2: Lötanlage 2 mit Fertigungszellen	40
Abbildung 5-3: THT-Montgearbeitsplatz der Baugruppen 1-4 als Shape in Microsoft Visio [firmeninterne Darstellung]	41

Abbildung 5-4: Großer Arbeitsplatz mit 2 IC-Testern als Shape in Microsoft Visio [firmeninterne Darstellung]	42
Abbildung 6-1: Das Konzeptmodell (Welle 2).....	56
Abbildung 6-2: Auszug aus einer Animation eines Simulationsexperiments	73
Abbildung 6-3: Ungeglättetes Diagramm der prozentualen Belegungen der Staustrecken 335,338,339.....	75
Abbildung 6-4: Ungeglättetes Diagramm der prozentualen Belegungen der Staustrecken 335,338,339 bei einer Stückzahlerhöhung um 15%	78
Abbildung 6-5: Ungeglättetes Diagramm der prozentualen Belegungen der Staustrecken 335,338,339 bei einer Stückzahlerhöhung um 25%	79
Abbildung 6-6: Ungeglättetes Diagramm der prozentualen Belegungen der Staustrecken 335,338,339 bei einer Stückzahlerhöhung um 50%	79
Abbildung 6-7: Ungeglättetes Diagramm der prozentualen Belegungen der Staustrecken 335,338,339 im Worst Case einer Umverteilung der Mitarbeiter.....	80
Abbildung 6-8: Durchlaufzeitenhistogramm bei einem Senkentakt von 60s	82
Abbildung 6-9: Durchlaufzeitenhistogramm bei einem Senkentakt von 600s	82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Typen von V&V-Elementen	24
Tabelle 5-1: Die Arbeitsplätze der einzelnen Fertigungslinien entkoppelt von der Endmontage	42
Tabelle 5-2: Die Restriktionen für den neuen Lötprozess	45
Tabelle 6-1: Die technischen Daten zu den Lötwellen und dem Transportbändern.....	58
Tabelle 6-2: Die Produktionsplanungsdaten	59
Tabelle 6-3: Die Maße der Transportbandabschnitte und Lötanlagen	60
Tabelle 6-4: Die aufbereiteten Produktionsdaten	62
Tabelle 6-5: Die aufbereiteten Maße der Transportbandabschnitte und Lötanlagen....	63
Tabelle 6-6: Die übernommenen Rohdaten	64
Tabelle 6-7: Die Parametrisierungen der Bausteine des ausführbaren Modells	65
Tabelle 6-8: Die Aufteilung der Baugruppen auf die drei Lötanlagen	74
Tabelle 6-9: Die Durchsätze der Lötanlagen	75
Tabelle 6-10: Die Auslastungen der Staustrecken 335,338,339	76
Tabelle 6-11: Die Taktzeiten der Quellen bei Stückzahlerhöhungen um 15%, 25% und 50%	77

1 Einleitung

Durch die zunehmenden globalen Verflechtungen der Märkte erfahren produzierende Unternehmen einen immer größer werdenden Konkurrenzdruck. International agierende Unternehmen konzentrieren sich daher immer gezielter auf ihr Produktionssystem und führen in immer kürzeren Abständen Prozessoptimierungen durch. Energiesparende, ressourcenschonende Maschinen nehmen in nahezu allen Branchen eine übergeordnete Rolle ein. Um konkurrenzfähige Preise anbieten zu können, reduzieren die Hersteller ihre Lagerbestände und verkürzen die Durchlaufzeiten ihrer Produkte. Ein weltweit führender Hersteller von Pumpen und Pumpensystemen für die Heizungs- Kälte- und Klimatechnik sowie Wasserver- und Abwasserentsorgung plant eine Erweiterung seiner Produktpalette. Es werden neue, energieeffizientere Pumpen auf den Markt gebracht, durch die man neue Märkte erschließen möchte. Aufgrund von Platzmangel muss die Elektronikfertigung vergrößert werden. Die Werksvergrößerung soll mit einer Optimierung sämtlicher Produktionsprozesse einhergehen.

Ziel dieser Arbeit ist die Planung eines automatisierten Lötprozesses unter besonderer Berücksichtigung einer Schlanke Produktion, die sich durch die Reduzierung sämtlicher Lagerbestände und Zwischenpuffer auszeichnet. Bei dem Lötprozess werden Elektronikkomponenten auf einer Leiterplatte fixiert. Dafür stehen künftig drei Wellenlötanlagen zur Verfügung, die mit ihren Transportelementen ausgelegt werden sollen. Mit einem bausteinorientierten Simulationstool soll die Planung des Prozesses anschließend analysiert werden. Dazu sollen das Verbesserungspotential hinsichtlich einer schlanken Prozessführung herausgestellt und Maßnahmen zur Durchlaufzeitverkürzung und Bestandsreduzierung erarbeitet werden. Das Löten ist einer der Kernprozesse der Fertigung und taktgebend für vor- und nachgelagerte Prozesse. Es steht daher bei der Optimierung des Produktionssystems besonders im Fokus. Im theoretischen Teil dieser Arbeit wird zunächst die Lean Production, welche als Grundlage der stattfindenden Neugestaltung dienen soll, vorgestellt. Es werden verschiedene Konzepte zur Schlanke Produktion erläutert und auf ihre Grundidee heruntergebrochen. Außerdem wird die ereignisdiskrete Simulation als Werkzeug der Prozessanalyse behandelt. Dabei soll die strukturelle Grundlage für die später durchgeführte Studie erörtert und mit einer Vorgehensweise zur Verifikation und Validierung zusammengebracht werden. Im praktischen Teil soll zunächst eine Ist-Analyse des Produktionssystems stattfinden. Dann sollen das Verbesserungspotenzial erörtert und Maßnahmen vorgestellt werden, mit denen die Lean-Production-Konzepte aus dem Theorieteil umsetzbar sind. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen kann das automatisierte Löten, einer der Schlüsselprozesse des Produktionssystems, neu geplant werden. Anschließend soll die Planung mithilfe eines Simulationstools überprüft und gegebenenfalls optimiert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse stellen

die geforderte Bewertungsgrundlage für den geplanten Prozess dar. Nach positiver Bewertung des Prozesses kann die Planung der Studie in die Realisierungsphase übergehen. Als letztes sollen im Schlussteil die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und unter besonderer Berücksichtigung der Simulationsergebnisse analysiert werden. Außerdem soll ein Ausblick darüber gegeben werden, welche Aufgaben sich mittel- und unmittelbar ergeben.

Aus Gründen des Datenschutzes darf der Name des Unternehmens nicht genannt werden, die Produktnamen und andere Daten im Hauptteil wurden anonymisiert.

2 Lean-Production-Konzepte zur Durchlaufzeitverkürzung und Bestandsreduktion

1985 wurde am Massachusetts Institute of Technology eine Studie zur „Untersuchung von 90 Montagewerken in 17 Ländern“ (Womack et al. 1990) in Auftrag gegeben. Das Ergebnis, das 1990 veröffentlicht wurde, zeigte klare Vorteile der japanischen Produktionskonzepte. Vor allem das bei Toyota angewandte Produktionssystem, das Toyota-Produktionssystem (TPS) wurde daraufhin genau analysiert. So kristallisierte sich heraus, dass der japanische Automobilhersteller nach dem zweiten Weltkrieg nicht nur das damals etablierte Ford-Produktionssystem analysierte und für sich weiterentwickelte, sondern auch Prinzipien aus der deutschen Industrie und Denkweisen aus dem asiatischen Raum miteinander vereinte. Als Begründer des TPS gilt Taiichi Ohno, der seit 1932 bei Toyota angestellt war, in den 1950er Jahren die Produktion leitete und seine praktischen Erfahrungen vor Ort mit einfließen lassen konnte. So entstand über Jahre ein „sehr durchdachtes, ausgefeiltes, vor allem sehr interdisziplinäres und umfassendes Zielportfolio“ [Dickmann et al. 2015, S.6]. Nach der Jahrtausendwende wurden für sämtliche Problematiken zunehmend IT-basierte Algorithmen favorisiert. Die Bausteine des TPS, wie z.B. die Materialflusssteuerung nach Kanban (vgl. Kapitel 2.2), sind zwar technologisch nicht so aufwendig, stellen jedoch in ihrer Gesamtheit einen bis heute „kaum vollständig umgesetzten, interdisziplinären Baukasten“ [Dickmann et al. 2015, S.6] dar, dessen originale Definitionen „noch immer anspruchsvolle Zielvorgaben vorlegen, um im internationalen Wettbewerb erfolgreich zu sein“ [Dickmann et al. 2015, S.6]. Die Methodik des Toyota-Produktionssystems wird aufgrund der Reduzierung der Ressourcen in Form von Mitarbeitern, Beständen und Betriebsmitteln gegenüber der klassischen Massenproduktion auch als *Lean Production* oder zu Deutsch: *Schlanke Produktion* bezeichnet. Während die klassische Massenfertigung kleine Zwischenbestände, Puffer, einrichtete, um sicher zu gehen, dass überall zu jeder Zeit genügend Material vorhanden ist, versucht Lean Production die Bestände möglichst gering zu halten, um Ressourcen in Form von Lagerplatz und Arbeitskraft zu schonen. Seit ihrer Rezeption wird die Schlanke Produktion nicht nur im Automobilbereich sondern auch in vielen anderen Industriezweigen angestrebt. Im Folgenden werden einige Bausteine der Lean Production beschrieben, die in dem neuen Produktionssystem des Pumpenherstellers zur Anwendung kommen sollen. [Dickmann et al. 2015], [Ohno 2009], [Womack et al. 1990]

2.1 Das Pull-Prinzip

Das sogenannte *Pull-Prinzip* bezeichnet eine bedarfsgesteuerte Produktion. Der Auslöser für die Produktion eines Erzeugnisses ist der Kunde. Die Pull-Steuerung arbeitet dem Produktionsablauf also entgegen und „zieht“ (engl. = [to] pull) bzw. bestimmt anhand von Aufträgen die Menge und Art der produzierten Güter. Dies bedeutet, dass nur der letzte Produktionsteilprozess über die Bedarfe der Enderzeugnisse informiert wird. Die letzte Arbeitsstation übermittelt dann seine Bedarfe an die vorgelagerte Arbeitsstation und die wiederum an ihre Zuarbeiter. Daraus folgt, dass an jeder Station nur der aktuelle Bedarf produziert und so jegliche Art der Überproduktion vermieden wird. Um eine Pull-Steuerung im Rahmen der Schlanken Produktion realisieren zu können, muss ein Industrieunternehmen in der Lage sein, die Fertigung präzise zu planen. Dazu sollte es drei Ebenen der Produktionsplanung geben: kurz-, mittel- und langfristig. Die langfristige Planung beinhaltet im Toyota-Produktionssystem ein Kalenderjahr, die mittelfristige wird für einen Monat im Voraus angelegt. Diese beiden Planungshorizonte werden den Zulieferern übermittelt, damit diese ihre Produktion an die prognostizierten Bedarfe anpassen können. Bei der Kommunikation ist das *Supply Chain Management*, also das Management entlang der gesamten Entstehungskette eines Produktes, von enormer Bedeutung. Die Tagesplanung wird aus der lang- und mittelfristigen Planung abgeleitet und sollte besonderen Wert auf *Produktionsnivellierung* (vgl. Kapitel 2.2) legen. [Becker 2006]

Zur Umsetzung des Pull-Prinzips werden sogenannte Supermärkte eingeführt, die mit Hilfe eines *Kanban-Regelkreises* betrieben werden. Ein *Kanban* (zu Deutsch: Zeichenbrett) ist im Wesentlichen eine Informationskarte, die einem automatisch ausgelösten Fertigungsauftrag gleicht. Auf dem Kanban können sich Informationen zur Entnahme, zum Transport und zur Produktion befinden. Abbildung 2-1 zeigt beispielhaft eine Kanban-Karte von Toyota

Lieferzeitpunkt 10:30  Ohashi Iron Works Regal-Nr 1 – unten	Lagerbereich A 1-1		Toyota Motors Zentrale
	Teile-Nr 53018-60011	Identifizierung	Montage-Nr 2
	Teile-Bezeichnung Kühlerventilator	für Wagentyp FJ(1)	
	21	Behältertyp spezial	50
Teilebestell-kanban		Behälterkapazität 30	

Abbildung 2-1: Kanban-Karte von Toyota [Ohno 2009, S.62]

Benötigt ein Mitarbeiter an seiner Arbeitsstation Material, bedient er sich im Supermarkt und sendet ein Kanban an die vorgeschaltete Station. Abbildung 2-2 zeigt ein mögliches Schema eines Kanban-Regelkreises:

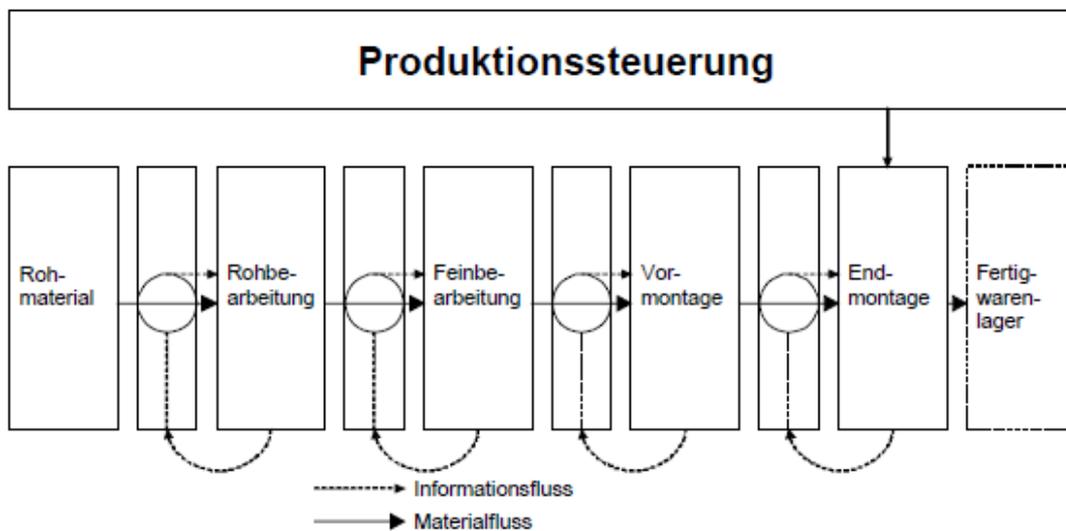


Abbildung 2-2: Kanban-Regelkreis mit Material- und Informationsfluss [Brunner 2014, S.106]

Das Supermarktregal ist ein Pufferlager, welches über alle Varianten eines Zwischenerzeugnisses verfügt. Es wird mit Hilfe eines Mindest- und eines Maximalbestandes gesteuert und normalerweise nach der *First-In-First-Out-Strategie* (FIFO) be- bzw. entladen. Teile gleichen Typs die zuerst eingelagert wurden, werden auch zuerst

wieder entnommen. Dies hat den Vorteil, dass Artikel mit Mindesthaltbarkeitsdatum nicht Gefahr laufen, eine wesentliche Alterung während des Einlagerns zu erfahren. Der Mitarbeiter an der vorherigen Station sorgt dann dafür, dass genau die Anzahl an Teilen nachproduziert wird, lagert sie wieder im Supermarkt ein und bringt das Kanban mit den nachproduzierten Teilen wieder an seinen ursprünglichen Platz. Dieses System macht einen besonderen Produktionsplan überflüssig. Analytisch betrachtet spiegelt das Kanban also die tatsächliche Marktnachfrage wider, es ist folglich nicht möglich, an dieser vorbei zu planen. [Dickmann et al. 2015], [Ohno 2009], [Becker 2006]

2.2 Heijunka (Produktionsnivellierung)

Das Supermarktsystem mit Kanban-Steuerung kann bei plötzlicher Nachfrage bzw. Entnahme einer großen Menge schnell an seine Grenzen stoßen. Eine so entstehende Störung muss verhindert werden, denn sie kann zu Schwierigkeiten in Form von großen Bedarfsschwankungen für die vorgelagerten Prozesse führen. Daher ist eine Produktionsnivellierung mit Auslastungsglättung von zentraler Bedeutung für das Pull-System. Eine Auslastungsglättung, also eine möglichst konstante Auslastung aller Betriebsmittel unter der Prämisse eines veränderlichen Marktes, kann nur erfolgen, wenn das Unternehmen in der Lage ist, einen kontinuierlichen Fertigungsfluss, eine konstante Fertigungsgeschwindigkeit und eine optimale Kapazitätsauslastung abzubilden. Um dabei mit der nötigen Flexibilität agieren zu können, ist es einerseits notwendig, kleine Losgrößen zu schaffen und andererseits die Rüstzeiten kurz zu halten. Eine Möglichkeit ist es, jeweils die gesamten Bestellmengen einer Periode gleichmäßig über die Tage zu verteilen und so an jedem Produktionstag den gleichen Mix aus den unterschiedlichen Produkten zu fertigen. Dies hat zur Folge, dass öfter umgerüstet werden muss. Man strebt daher einen raschen Werkzeugwechsel (*rapid setup*) an. Hier hat sich das Konzept *single minute exchange of die* (zu Deutsch: Werkzeugwechsel im einstelligen Minutenbereich) bewährt, bei dem man möglichst auf Nachjustierungen verzichtet. Als Voraussetzung dafür gilt die Vermeidung von Spezialmaschinen. Dies hat naturgemäß zur Folge, dass der Prozess der Festlegung der Betriebsmittel zeitaufwändiger ist. Eine weitere Säule der Produktionsnivellierung wird im Toyota-Produktionssystem als *Shojinka* bezeichnet und beschreibt die erhöhte Flexibilität der Mitarbeiter. Diese können sich durch mehr Selbstverantwortung einer höheren Motivation erfreuen und sind angehalten, den eigenen Arbeitsplatz ständig zu verbessern. Sie müssen dafür breit ausgebildet sein, um, im Sinne des kontinuierlichen Produktionsflusses (vgl. Kapitel 2.3), mehrere Arbeitsgänge selbstständig zu beherrschen und ausführen zu können. [Becker 2006], [Dickmann 2015], [Brunner 2014], [Ohne 2009], [Brenner 2015]

Heijunka baut auf dem allgemeinen Konzept der 3 M's: *Muda*, *Muri*, *Mura* auf. Die drei Begriffe stehen für ungewollte Zustände in der Produktion. *Muda* bedeutet Verschwendungen und stellt „die offensichtlichste Ursache für die Entstehung von Verlusten“ [Brunner 2014] dar. Alle Teilprozesse werden zur Klassifizierung unterteilt in:

1. Tätigkeiten, die nicht zur Wertschöpfung beitragen,
2. Tätigkeiten, die zur Wertschöpfung des Produktes beitragen und
3. Tätigkeiten, die zwar nicht zur Wertschöpfung des Produktes beitragen, jedoch für den Produktionsprozess unverzichtbar sind.

Um *Muda* deutlicher identifizieren zu können, hat Taiichi Ohno für das TPS sieben Arten der Verschwendung definiert:

1. Überproduktion
2. Wartezeiten
3. Transport
4. Unnötige Bearbeitung
5. Lager
6. Überflüssige Bewegung
7. Defekte Produkte

Um die Arten der Verschwendung voneinander abzugrenzen, können sie nach ihrer Entstehung in drei Kategorien unterteilt werden. So kann z.B. das Warten auf Material, die Suche nach dem geeigneten Werkzeug und das Verursachen von Fehlern dem Menschen zugeordnet werden, die Maschine hingegen bedingt Rüstzeit, technische Ausfälle und Wartung. Am Material werden vermeidbare Arbeiten in Form von unnötigem Transport, Lagerung, Qualitätskontrolle und Nacharbeit verrichtet. *Muri* (zu Deutsch: Überbeanspruchung) beschreibt den Zustand von Überlastung und steht somit im Gegensatz zur Verschwendung von Ressourcen. Dies kann sowohl für die Maschine als auch für den Arbeiter gelten. Häufig hat *Muri* maschinenbedingte Ausfälle und Sicherheitsprobleme zu Folge. Stellt sich ein Wechselspiel von *Muda* und *Muri* ein, so spricht man von einer ungleichmäßigen Produktion, japanisch: *Mura*. Häufig resultiert *Mura* aus nicht nivellierten Produktionsvolumina. Abbildung 2-3 zeigt die Verschmelzung der drei Zustände. [Liker 2004], [Ohno 2009], [Becker 2006, S.278 ff.], [Brunner 2014]

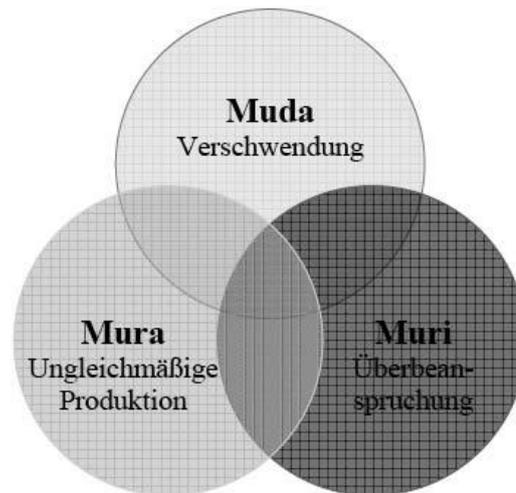


Abbildung 2-3: Die Verschmelzung von Muda, Mura, Muri [Liker: Toyota Way 2004, S.115]

2.3 Kontinuierlicher Produktionsfluss

Ein wesentlicher Bestandteil der Lean-Production-Konzepte ist das Streben nach einem kontinuierlichen Produktionsfluss, der wesentlich zur Vermeidung von Verschwendung beiträgt. Unternehmen, die ihr Produktionssystem dementsprechend ausrichten, vollziehen dabei die Fertigung eines Enderzeugnisses ohne Pausen und Puffer. [Liker 2004], [Dickmann 2015], [Ohno 2009]

2.3.1 One-Piece-Flow

Dabei haben viele Unternehmen die Vision eines *One-piece-flows*, also eines Einzelstückflusses. Dieses Konzept gilt als Grundlage für das Fließprinzip. Ein Werkstück wird nach seiner Bearbeitung direkt weiter an den nächsten Arbeitsschritt gegeben und dort, ohne Unterbrechung weiter bearbeitet. Dies kann nur erfolgen, wenn vor jedem Prozessschritt maximal ein Werkstück bereitgestellt wird oder, anders formuliert, die Losgröße eins beträgt. Die Konsequenz aus dem Wegfall des Puffers ist, dass bei Stillstand eines Prozesses u.a. wegen Qualitätsproblemen der vorgelagerte Prozess nicht weiter fertigen darf. Dadurch wird eine schnelle Lösung des Problems forciert. Weitere Vorteile des durchgängigen Flusses sind der optimale Cashflow und die Möglichkeit der schnellen Reaktion auf Kundenwünsche. Ersteres ist dem wenigen Material in der Fertigungszone geschuldet. Außerdem werden minimale Durchlaufzeiten erreicht, denn im Sinne eines ununterbrochenen Flusses muss die Linie homogen ausgetaktet sein. Als weitere Voraussetzungen muss die Produktion möglichst gut nivelliert sein (vgl. Kapitel 2.2), denn es werden eine hohe Flexibilität der Mitarbeiter und kurze Rüstzeiten verlangt. Nicht jedes Unternehmen kann alle Voraussetzungen für diese Vision erfüllen, daher wird oftmals nicht durchgängig im OPF produziert.

Stattdessen werden einige Prozesse entkoppelt und durch einen Puffer miteinander verbunden. [Dickmann 2015], [Ohno 2009]

2.3.2 Just-in-time

Das *Just-in-time-Prinzip* (JIT) beschreibt eine Philosophie, die Produktionsflüsse ganzheitlich zu optimieren versucht. JIT stellt folglich einerseits ein Logistikkonzept dar und deutet andererseits auf eine Prozessverknüpfung nach dem bereits beschriebenen Flussprinzip hin (vgl. Kapitel 2.3.1). JIT bedeutet, laut allgemein gültiger Definition, „das Material zur richtigen Zeit, in der richtigen Qualität, in der richtigen Menge und am richtigen Ort bereitzustellen“ [Dickmann et al. 2015]. In der Automobilindustrie werden heutzutage standardmäßig Zulieferer mit Hilfe von MRP- bzw. ERP-Systemen so in die Produktionsprozesse mit eingebunden, dass sie Teile zeitscharf direkt ans Montageband liefern. Üblicherweise lagert der Zulieferer dazu die Teile vor. Dem Kunden erspart das zusätzliche Lagerflächen, so dass je nach Ausprägung der Kunden-Lieferanten-Verbindung der Verbraucher wenig bis gar keine Pufferplätze vorsehen muss. Ein großer Vorteil hierbei ist eine ortsnahe Anlieferung, d.h. die Entfernung zwischen Zulieferer und Abnehmer spielt eine entscheidende Rolle, denn je weiter beide voneinander entfernt sind, desto länger dauert die Lieferung. Eine lange Lieferdauer wiederum verursacht ein höheres LKW-Aufkommen und verlagert mehr Volumen an Erzeugnissen auf die Straße, was eine negative Auswirkung auf den Cashflow und die Durchlaufzeit darstellt. [Dickmann et al. 2015], [Ohno 2009]

Eine Weiterentwicklung des JIT-Konzeptes ist die *Just-in-sequenz-Anlieferung* (JIS). Sie ergänzt das Prinzip um die richtige Reihenfolge, in der die Teile bereitgestellt werden, wie Abbildung 2-4 zeigt:

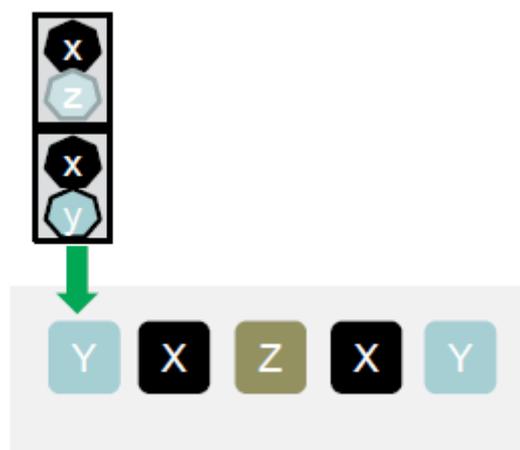


Abbildung 2-4: Just-in-sequence-Anlieferung [Dickmann et al. 2015, S.17]

Die Anlieferung JIT zeichnet sich durch eine einheitliche Materialnummer für das komplette Los bzw. Gebinde aus, wohingegen bei JIS „Behälter in einer Reihenfolge und in den Behältern die verschiedenen Materialien ebenfalls in Auftragsabfolge hintereinander bereitgestellt“ [Dickmann et al. 2015] werden. Das stabile Praktizieren von JIT stellt also die Grundvoraussetzung für die Einführung von JIS, also das Liefern in verbausynchroner Reihenfolge, dar. [Dickmann et al. 2015]

2.4 Kaizen

Um sich den immer wachsenden Anforderungen der Kunden an Flexibilität, Kosten und Schnelligkeit stellen zu können, müssen Unternehmen sich ständig verbessern. Dazu gibt es in der Lean-Production-Philosophie die sogenannte *Kaizen*-Mentalität. *Kaizen* kommt aus dem Japanischen und bedeutet etwa „Verändern zum Besseren“. Abbildung 2-5 zeigt die wörtliche Übersetzung:



Abbildung 2-5: Die wörtliche Übersetzung von Kaizen [Brunner 2014, S.11]

Im Allgemeinen wird Kaizen als „ständige Verbesserung in kleinen Schritten“ verstanden. [Brunner 2014] Es stellt also, entgegen einiger Interpretationen, eine „prozessorientierte Denkweise im Sinne einer Geisteshaltung“ dar und keine Methode zur Lösungsfindung eines konkreten Problems. [Brunner 2014] Entscheidend ist, dass das Konzept von Geschäftsleitung, Führungskräften und direkten Mitarbeitern gleichermaßen gelebt wird. Das Management muss gewährleisten, dass alle Menschen am „Ort des Geschehens“ (japanisch: *Gemba*), also in den einzelnen Fertigungszellen, die Ziele verstehen. Hierbei soll der Fokus auf *Gembutsu*, also den realen Dingen,

liegen und nach *Muda* (vgl. Kapitel 2.3.1), also Verschwendung, gesucht werden. Abbildung 2-6 zeigt schematisch den Gedanken des *Gemba-Kaizen*:

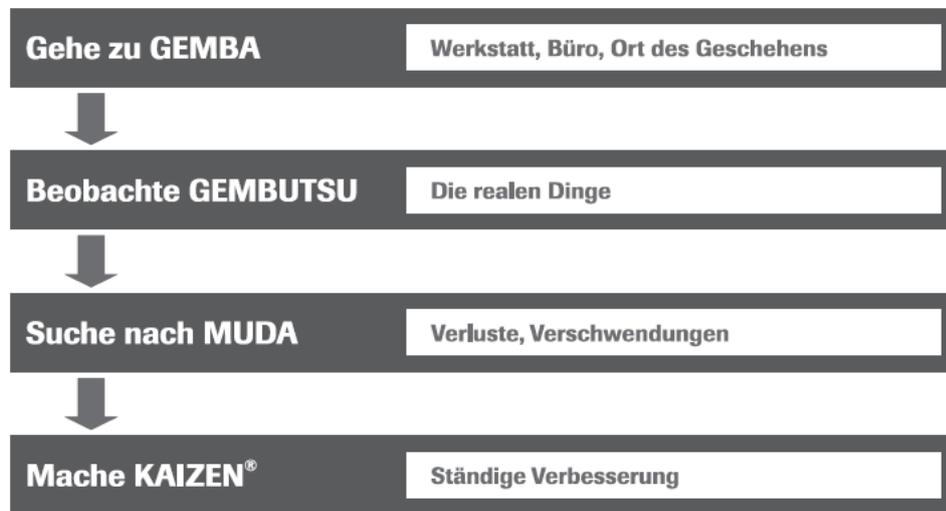


Abbildung 2-6: Gemba-Kaizen [Dickmann et al. 2015, S.26]

Kaizen wird oftmals in Verbindung mit dem 5S-Konzept angewendet. Die 5S stehen dabei für folgende Aktionen am Arbeitsplatz:

- *Seiri*: Aussortieren nicht mehr benötigter Gegenstände
- *Seiso*: Sauberhalten des Arbeitsplatzes
- *Seiton*: Arbeitsmittel ergonomisch anordnen und eine systematische Ordnung herbeiführen
- *Seiketsu*: die Anordnung standardisieren und verdeutlichen
- *Shitsuke*: ständige Verbesserung der vorherigen Punkte und Selbstdisziplin

Bei der Einführung und Änderung der Standards kommt der Visualisierung eine bedeutende Rolle zu. Die Darstellung kann durch Boards, Markierungen und/oder Fotos erfolgen. [Brunner 2014], [Dickmann et al. 2015], [Brenner 2015]

2.5 Total Productive Maintenance

Bei der Suche nach Verschwendungen im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes muss auch die Instandhaltung hinterfragt werden. In der Lean Production hat sich der Begriff der *Total Productive Maintenance* (TPM) etabliert. In der Fachliteratur wird TPM auch oftmals mit *Total Productive Management* gleichgesetzt, um herauszustellen, dass sich die Prinzipien der Instandhaltung zu einem eigenen, umfassenden Managementsystem weiterentwickelt haben. Im Folgenden soll jedoch nur der ursprüngliche Ansatz der

TPM, als Teil der Lean-Production-Philosophie dargestellt werden. Dieser Instandhaltungsansatz eint drei Säulen, wie Abbildung 2-7 zeigt:

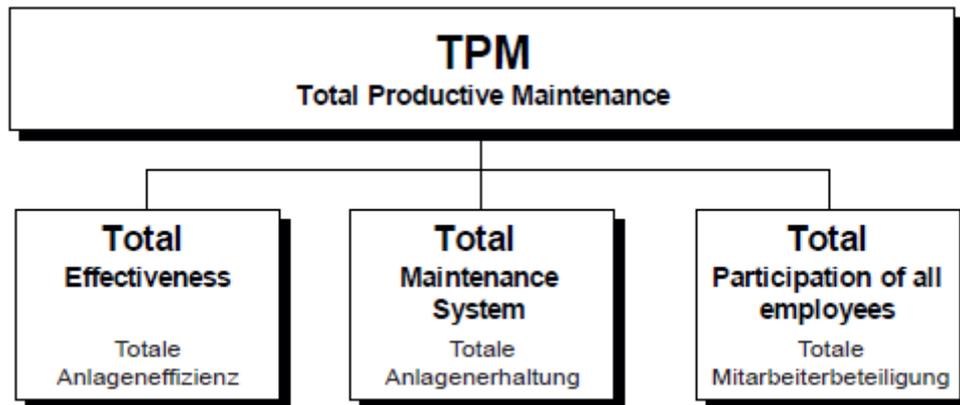


Abbildung 2-7: Die drei Säulen der TPM [Brunner 2014, S.78]

Die *Totale Anlageneffizienz* beschreibt das Streben nach einer maximalen Wirtschaftlichkeit aller Anlagen und Betriebsmittel. Die *Totale Anlagenerhaltung* beinhaltet nicht nur die Vorbeugung von Störzeiten durch regelmäßige Instandhaltung der Maschinen sondern auch eine Instandhaltbarkeitsverbesserung. Dafür führt TPM ein den Lebenszyklus der Maschine andauerndes, geplantes System der Instandhaltung ein. Die dritte Säule, die *Totale Mitarbeiterbeteiligung*, zeigt, dass ein ganzheitliches Instandhaltungskonzept in allen Abteilungen präsent sein und jeden Mitarbeiter vom Management bis zum Monteur in der Linie miteinbeziehen muss. Eine Weiterentwicklung des klassischen Instandhaltungsgedanken findet insofern statt, als dass die Instandhaltung nach Lean-Philosophie eine Gruppenaufgabe von Mitarbeitern der Instandhaltungsabteilung zusammen mit den Maschinenbetreuern darstellt. In klassischen Produktionssystemen ist die Instandhaltung ausschließlich die Aufgabe der extra dafür vorgesehenen Mitarbeiter. [Dickmann et al. 2015], [Brunner 2014]

2.6 Jidoka (Autonomation)

Ein wichtiger Bestandteil nahezu jeder Produktion ist die Qualitätssicherung. In der Lean Production findet die Sicherung der Qualität vor allem im Fertigungsprozess statt. Dieser Ansatz wird als *Autonome Qualitätssicherung* bezeichnet. Die Maschinen sollen hierbei Unregelmäßigkeiten selbstständig erkennen und den Fertigungsfluss stoppen. Dieses System heißt *Jidoka*. Es soll wechselseitige Kontrolle unter den Prozesseignern herrschen. Bei Toyota, z.B., wo ja, wie zuvor beschrieben, vornehmlich getaktet an Fließbändern gefertigt wird, werden zusätzlich direkt vor Ort Anzeigen installiert, die

grünes, gelbes oder rotes Licht anzeigen. Diese Tafeln helfen, Probleme direkt zu erkennen. Leuchten sie grün, so liegt keine Störung vor, der Fertigungsfluss nimmt seinen gewöhnlichen Lauf, bei gelb liegt ein Fehler vor, der aber noch innerhalb der Taktzeit behoben werden kann, und sobald rot angezeigt wird, stoppt das Bandsystem weil die Störung nicht schnell genug behoben werden konnte. Man möchte die Fehler an ihrer Wurzel erkennen und abstellen und nicht bloß die Symptome bekämpfen. Ein fünfmaliges „warum“-fragen kann zudem helfen, die Ursache einer Unregelmäßigkeit zu finden. Des Weiteren ist es essentiell, dass ein Fehler den nächsten Prozessschritt nicht erreicht, damit er sich gar nicht erst fortpflanzt. Folglich muss sichergestellt werden, dass nur fehlerfreie Teile weitergegeben bzw. angenommen werden. [Brunner 2014, S.118 ff]

Bei der Qualitätssicherung vor Ort ist die Vermeidung von Fehlern, als Anfang einer unerwünschten Kausalkette, von großer Relevanz. *Poka Yoke*, japanisch für das Vermeiden von unbeabsichtigten Fehlern, stellt ein führendes Qualitätsmanagement-Tool im Bereich der Lean Production dar. Es wird eine Null-Fehler-Strategie angestrebt. Dafür wird eine 100%-Qualitätsprüfung etabliert und versucht, Fehler im Prozess möglichst direkt nach ihrer Entstehung zu erkennen. Es sollen möglichst kostengünstige Vorrichtungen verbaut werden, die Abläufe sichern und Fehlerquellen ausmerzen. Ähnlich wie in *Kaizen*-Projekten (vgl. Kapitel 2.4) soll die Umsetzung der Neuerungen durch operative Mitarbeiter stattfinden. *Poka Yoke* versucht also „anomale Zustände zu erkennen, zu vermeiden und sofort durch unmittelbares Eingreifen abzustellen“. [Dickmann et al. 2015, S.63 ff] So könnte eine Umsetzung dieses Ansatzes sein, dass durch Vorrichtungen verhindert wird, dass ein Arbeiter einer Maschine falsches Material zuführt oder es in der falschen Richtung einführt. Dem Arbeiter wird auf diese Weise das Handling mehrerer Maschinen ermöglicht, ohne vorher eine große Anzahl an Regeln lernen zu müssen. [Dickmann et al. 2015, S.63 ff], [Becker 2006]

3 Ereignisdiskrete Simulation als Werkzeug der Prozessanalyse

Technische Prozessabläufe werden zunehmend komplexer und weisen eine immer detailliertere Digitalisierung auf. Das führt dazu, dass analytische Methoden zur Beschreibung von Material- und Informationsflüssen sowie statische Berechnungen nicht mehr vollends ausreichen, um verlässliche Aussagen über Produktionssysteme treffen zu können. Die VDI-Richtlinie 3633 beschreibt Simulation als das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ [VDI 2008, Abschnitt 1.4] Danach werden in Kapitel 3.3 verschiedene Modelle zur Vorgehensweise bei der Simulation in Produktion und Logistik diskutiert. Ein Modell, welches als für die Simulationsstudie geeignet befunden wird, soll dann die Struktur der weiteren Vorgehensweise bei der Erstellung der Simulationsstudie liefern. In diesem Kapitel der Arbeit soll (ausschließlich) die *ereignisdiskrete Simulation* erläutert und ihre Bedeutung für Produktion und Logistik erörtert werden. *Ereignisdiskrete Simulation* zeichnet sich dadurch aus, dass jedes für das System relevante Ereignis einen zeitlich folgenden Prozess beeinflussen kann und sowohl Einzelereignisse als auch Gesamtprozesse unter statistischen Mitteln ausgewertet werden können. [Rabe et al. 2008], [Kuhn et al. 1998]

3.1 Die Bedeutung von ereignisdiskreter Simulation für Produktionsprozesse und Materialflusskonzepte

Um die wirkliche Bedeutung von ereignisdiskreter Simulation für Produktion und Logistik erörtern zu können, müssen zunächst einige Grundbegriffe und deren Zusammenhänge erläutert werden. So spricht man in diesem Zusammenhang von *Experimentierbarkeit*, wenn ein Modell in der Lage ist, systemrelevante Parameter zu variieren. Die lateinische Herkunft des Wortes *Experiment* (lat. experimentum= Probe, Versuch) deutet darauf hin, dass Simulation nicht selbstständig eine optimale Lösung für Problem- und Fragestellungen liefert, sondern (lediglich) dem Anwender helfen kann, eine Situation bzw. einen Prozess auf Grund von Kennzahlen zu bewerten. Mit Simulation ist der Anwender folglich in der Lage, Versuchsreihen zu generieren, die ihm als Grundlage für seine Entscheidung aussagekräftige Informationen zur Verfügung stellen. Um eine Entscheidung folgerichtig zu treffen, muss eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse von dem Modell auf die Realität gegeben sein. Diese kann man sicherstellen, indem man bei jeder getroffenen Aussage die Vollständigkeit aller betrachteten Einflussgrößen, die zu dieser Aussage hinführten, überprüft. Diese ständige

Überprüfung wird in der Simulationstechnik und im Software Engineering als *Verifikation und Validierung* (V&V) bezeichnet. Näheres zur Implementierung von V&V in die Vorgehensweise bei der Erstellung einer Simulationsstudie befindet sich in Kapitel 3.5

Simulation lässt sich sowohl in Planungs- und Realisierungs- als auch in Betriebsphase einsetzen. Das häufigste Einsatzgebiet ist jedoch die Planungsphase eines Prozesses. Entlang dieser Phase kann Simulation die Planung absichern und anhand des Modells können schon vor der Realisierung Erfahrungen gesammelt werden. Sie kann es ermöglichen, rechtzeitig korrigierend einzugreifen. Es können außerdem Lagerplätze und Puffergrößen genauer bestimmt werden. Oftmals gestaltet sich deren Dimensionierung schwer, falls einfache, statische Mittel nicht zum Erfolg führen. Man neigt dazu, Lagerbestände aus Sicherheitsgründen unnötig groß auszulegen und so möglicherweise unfreiwillig gegen die Prinzipien einer schlanken Produktion (vgl. Kapitel 2) zu verstoßen. Zudem kann Simulation Informationen über Schwankungen von bestimmten Parametern liefern und so die Sensitivität eines Systems analysieren. Auch kann das Pflichtenheft auf Korrektheit überprüft werden. Dazu müssen dessen Inhalte zunächst in für das Modell relevante Parameter transformiert und dann durch Simulation verifiziert bzw. auf Vollständigkeit geprüft werden. Während der Realisierungsphase eines Prozesses bzw. eines Produktes soll vor allem die Inbetriebnahmezeit verkürzt werden. Einen optimalen Durchsatz zu erlangen stellt Unternehmen hierbei oft vor Probleme. Weitere Nutzen der Simulation sind die Möglichkeit zur Schulung von Mitarbeitern am Modell noch bevor das reale System existiert und die Verknüpfung von Entwicklung und Testen prozessnaher Software. Während des Betriebs einer Anlage kann sich Simulation darauf konzentrieren, eine strategische Alternative zu finden, die nötig ist, falls Störungen oder sonstiges auftreten. [Rabe et al. 2008]

Eine weitere Möglichkeit der strukturierten Auflistung der Einsatzfelder von Optimierung mit Hilfe von Simulationstechnik geben März et al. (2011), die, wie Abbildung 3-1 zeigt, in Anlehnung an Gierrh und Schmidt (2006) die Änderungsdynamik über dem Planungshorizont auftragen und so eine Unterteilung nach kurz-, mittel- und langfristigen Optimierungspotenzialen vornehmen.

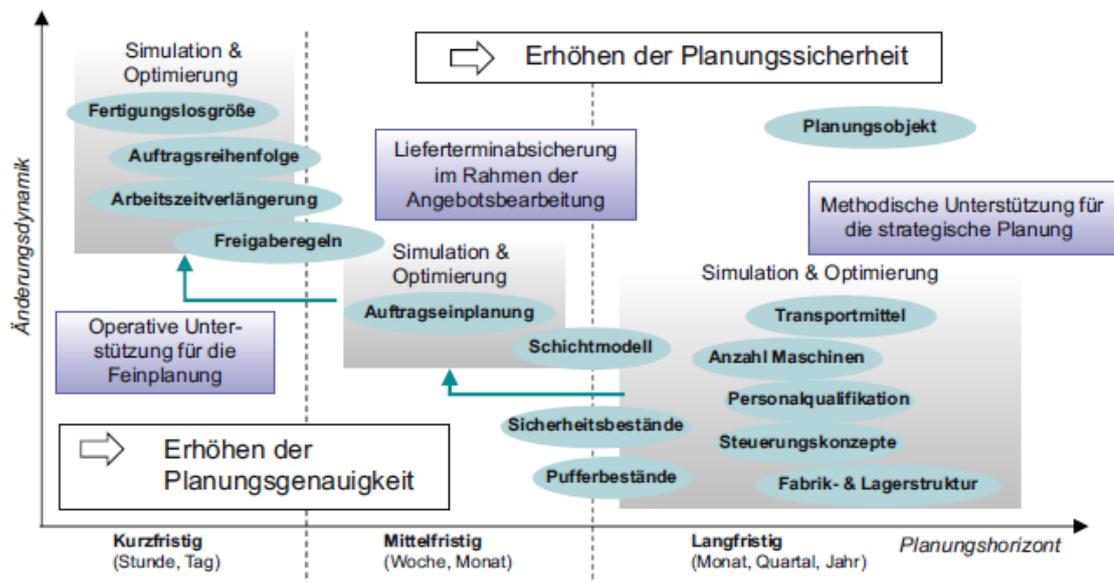


Abbildung 3-1: Einsatzfelder der simulationsgestützten Optimierung [März et al. 2011, S.4]

Hieraus geht klar hervor, welche Vielseitigkeit mit dem Einsatz von Simulationstechnik einhergeht. Besonders die Bereiche der langfristigen Planung lassen erahnen, welche Kostenersparnisse durch simulationsgestützte Optimierung möglich sind und wie groß die Bedeutung für Produktion und Logistik aktuell ist. Tendenziell wird durch zunehmende Digitalisierung (auch im Hinblick auf Fabrik 4.0) und immer größer werdende Konkurrenz in nahezu allen Märkten die Rolle der ereignisdiskreten Simulation in den kommenden Jahrzehnten zunehmend gestärkt. [März et al. 2011], [Bauernhansl et al. 2014]

3.2 Verifikation und Validierung als Bestandteil von Simulationsstudien

Um gewährleisten zu können, dass ein Modell ausschließlich korrekte Rückschlüsse auf die Realität zulässt, muss, unabhängig von der Vorgehensweise in der Studie, zum einen kontinuierlich überprüft werden, „ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde“ und zum anderen, „ob die Modelle das Verhalten des abgebildeten Systems hinreichend genau wiedergeben“ [Rabe et al. 2008]. Dies sind die Aufgaben einer simulationsbegleitenden Verifikation und Validierung. Allgemeiner bezeichnet die VDI-Richtlinie 3633 die Verifikation als „[...] formalen Nachweis der Korrektheit des Simulationsmodells“ [VDI 2008, Abschnitt 6.5.3]. In Analogie zum Software Engineering ist also nachzuweisen, dass das

erstellte Simulationsmodell das Konzeptmodell korrekt darstellt. Korrektheit bedeutet in diesem Zusammenhang das Erzielen einer ausreichenden Genauigkeit der wiedergegebenen Prozesse zur Gewährleistung von richtigen Rückschlüssen. Da diese Definition auch von Subjektivität geprägt ist, soll die Verifikation in dieser Simulationsstudie (Kapitel 6) gemäß Rabe et al. (2008) die „Überprüfung von Phasenergebnissen während des gesamten Simulationsprojektes“ beinhalten. Die Validierung ist nach VDI-Richtlinie 3633 eine „Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Originalsystem“. Sie soll also sicherstellen, dass das Verhalten des Modells, welches zur Erlangung der gewünschten Aussagen führt, mit dem Verhalten des realen Systems übereinstimmt. Selbstverständlich schließt dies ein, dass alle verwendeten Daten vor Benutzung validiert werden müssen. V&V sollen also zusammengefasst dafür Sorge tragen, dass die Verwendung von simulationstechnischen Systemen nicht zu falschen Aussagen führt.

3.3 Simulationsvorgehensmodelle und ihre Strukturen

Um eine Simulationsstudie strukturiert ausführen zu können, sollte man sich im Vorhinein für ein *Simulationsvorgehensmodell* entscheiden. Dieses Kapitel erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, es soll lediglich einen Überblick über die weitverbreitetsten geben und dem Leser darlegen, warum sich für das in der folgenden Simulationsstudie verfolgte Vorgehensmodell entschieden wurde.

Nahezu alle Modelle zur Vorgehensweise bei Simulationsstudien verfügen laut Banks et al. (1988) über die fünf essentiellen Bausteine:

- Aufgabenanalyse
- Modellformulierung
- Modellimplementierung
- Modellüberprüfung
- Modellanwendung

Rabe et al. (2008) analysieren vornehmlich drei Simulationsvorgehensmodelle, darunter das „Vorgehensmodell Simulation“ nach Sargent 1982

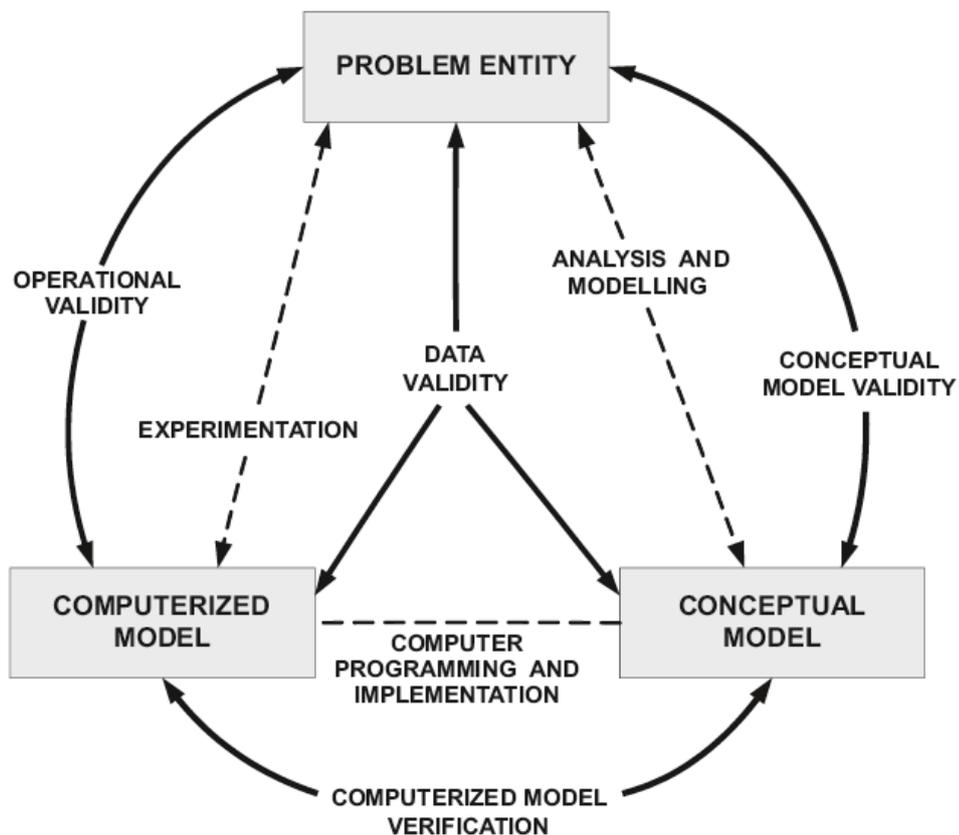


Abbildung 3-2: Simulationsvorgehensmodell (nach Sargent 1982) [Rabe et al. 2008, S.31]

Man erkennt deutlich, dass die fünf Grundbausteine, die zuvor diskutiert wurden, um einige Aspekte erweitert wurden. So spielt die Validierung (engl.: validity) eine zentrale Rolle und wird sowohl bei der Erstellung des Konzeptmodells (engl.: conceptual model) als auch bei der Überführung in ein computergestütztes Modell (engl.: computerized model) unter besonderer Berücksichtigung der Problemstellung (engl.: problem entity) angewendet.

Ein weitaus komplexeres Modell stellte Balci (1989) vor:

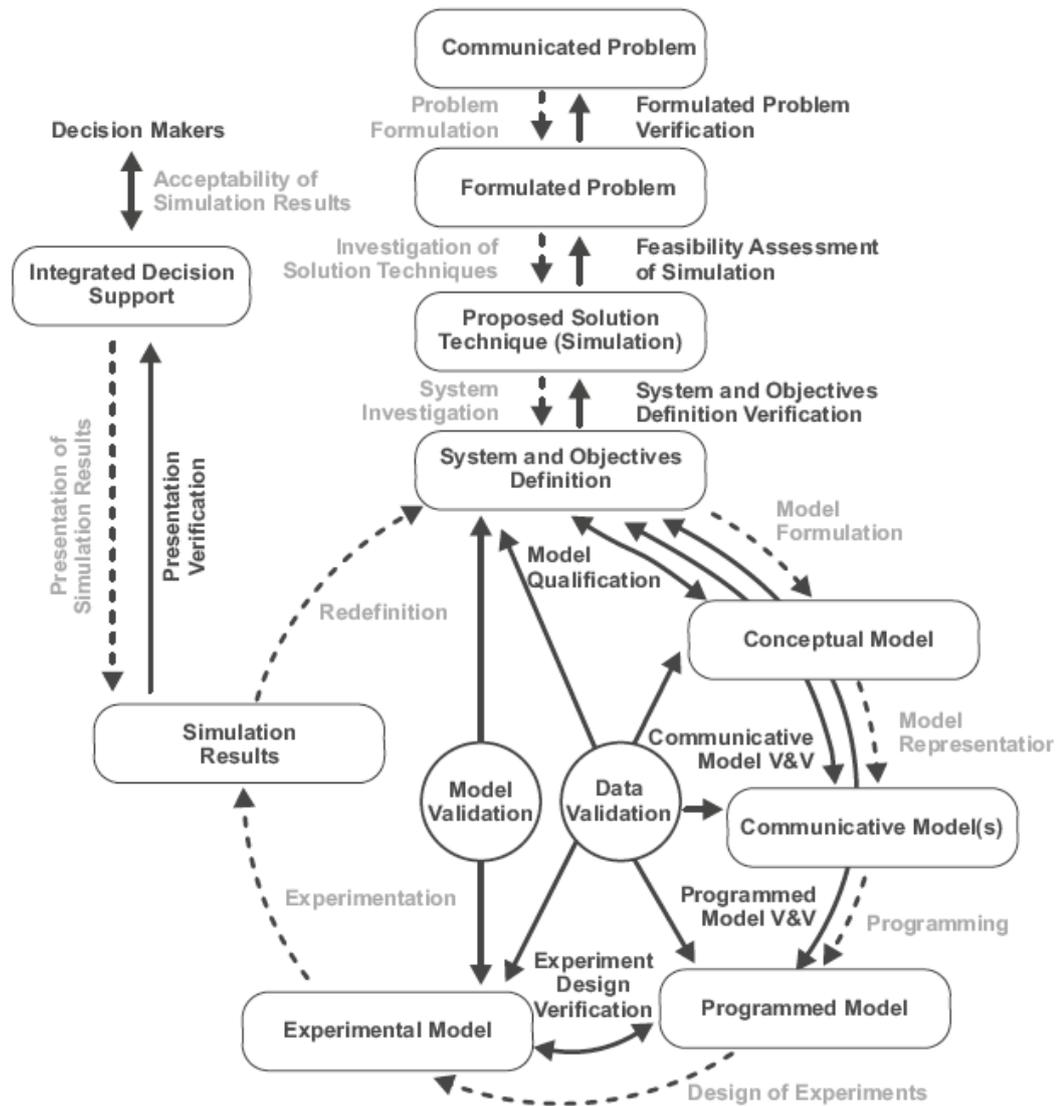


Abbildung 3-3: Simulationsvorgehensmodell (nach Balci 1989) [Rabe et al. 2008, S.30]

Dieses Modell befasst sich u.a. intensiver mit der Problemstellung und implementiert diese unter Berufung auf die Recherche von Lösungsansätzen (engl.: investigation of solution techniques) und Systemen (engl.: system investigation). Auch hier werden einige Teilergebnisse bzw. Überführungen von Daten und Systemen der Verifikation und Validierung unterzogen. Es werden neben den Datenstrukturen (engl.: data validation) auch die einzeln erstellten Modelle unter Berücksichtigung von V&V überführt. Hierbei kann man von einem vollständigen Modell sprechen, denn es verfügt, neben einer genauen Problembehandlung auch über eine Beschreibung der Abläufe bis zu einem Entscheidungsträger (engl.: decision maker).

Ein drittes Simulationsvorgehensmodell wurde vom VDI (2008) in der Richtlinie 3633 auf Blatt 1 gezeigt:

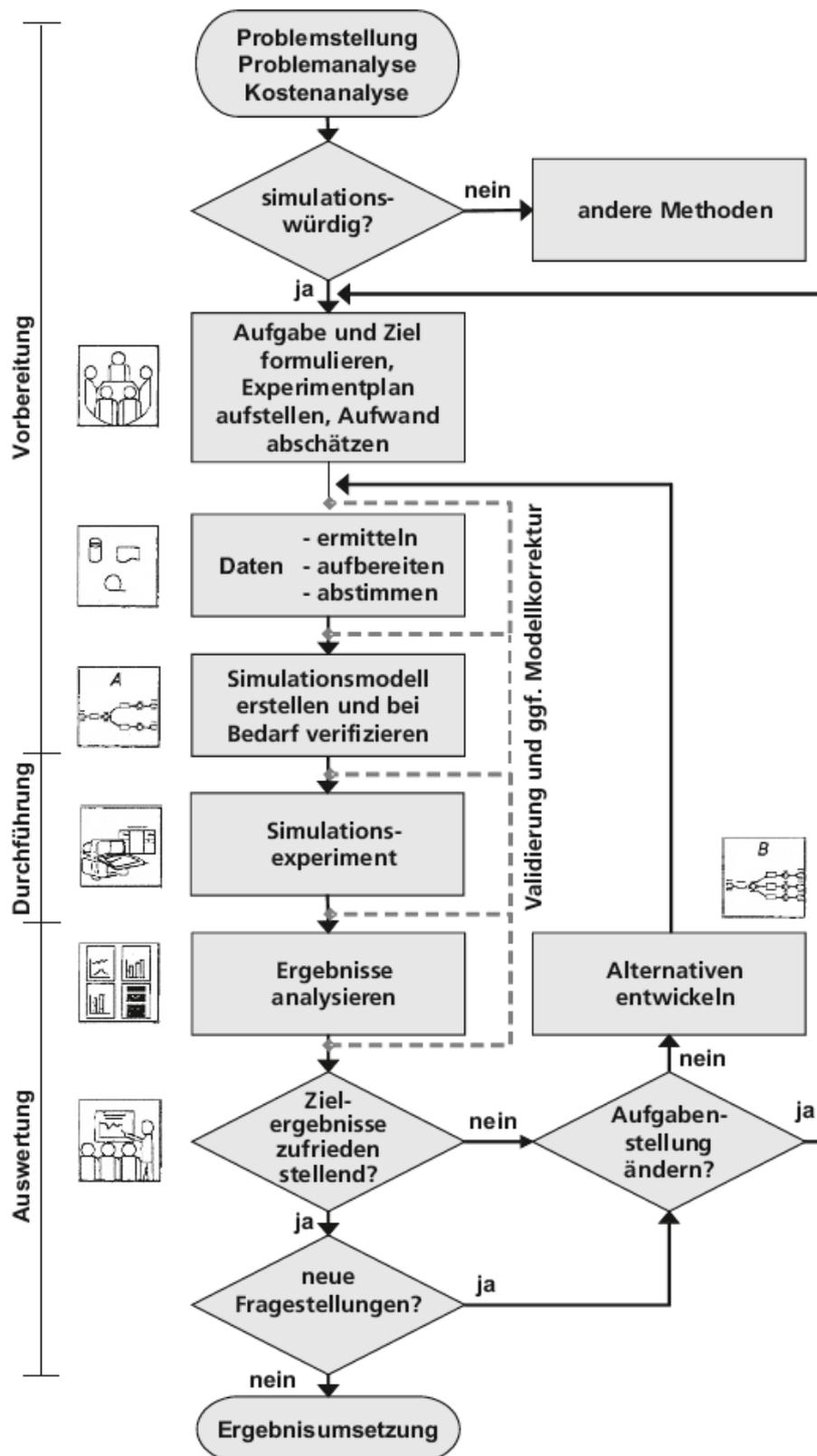


Abbildung 3-4: Simulationsvorgehensmodell (nach VDI 2008) [Rabe et al. 2008, S.32]

Dieses Modell weist einen anderen Detaillierungsgrad als das Balci'sche Modell auf, so ergänzt es jene Darstellung um die Phasen des Ablaufs der jeweiligen Studie. Alle Tätigkeiten von Problemanalyse bis hin zur Erstellung und Verifizierung des Modells werden der Vorbereitungsphase zugeordnet. Damit stellt sie den größten Teil des Vorgehensmodells. Zur Durchführungsphase zählen einzig die Simulationsexperimente und der anschließende Teil bildet die Auswertungsphase. Validierung kommt in allen drei Phasen zum Einsatz und ist eng an die Modellkorrektur gekoppelt. Verifiziert wird nach diesem Ansatz nur die Erstellung des Simulationsmodells. Insgesamt ist das Modell strukturell wie eine Entscheidungstabelle aufgebaut. [Rabe et al. 2008]

3.4 Das Simulationsvorgehensmodell nach ASIM

Für die Simulationsstudie in dieser Arbeit soll das Vorgehensmodell, welches die Arbeitsgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“ der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) aus der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (VDI 2008, Bild 7) zum Zwecke einer angemessenen Betrachtung von V&V (weiter-) entwickelt hat, verwendet werden (Abbildung 3-5).

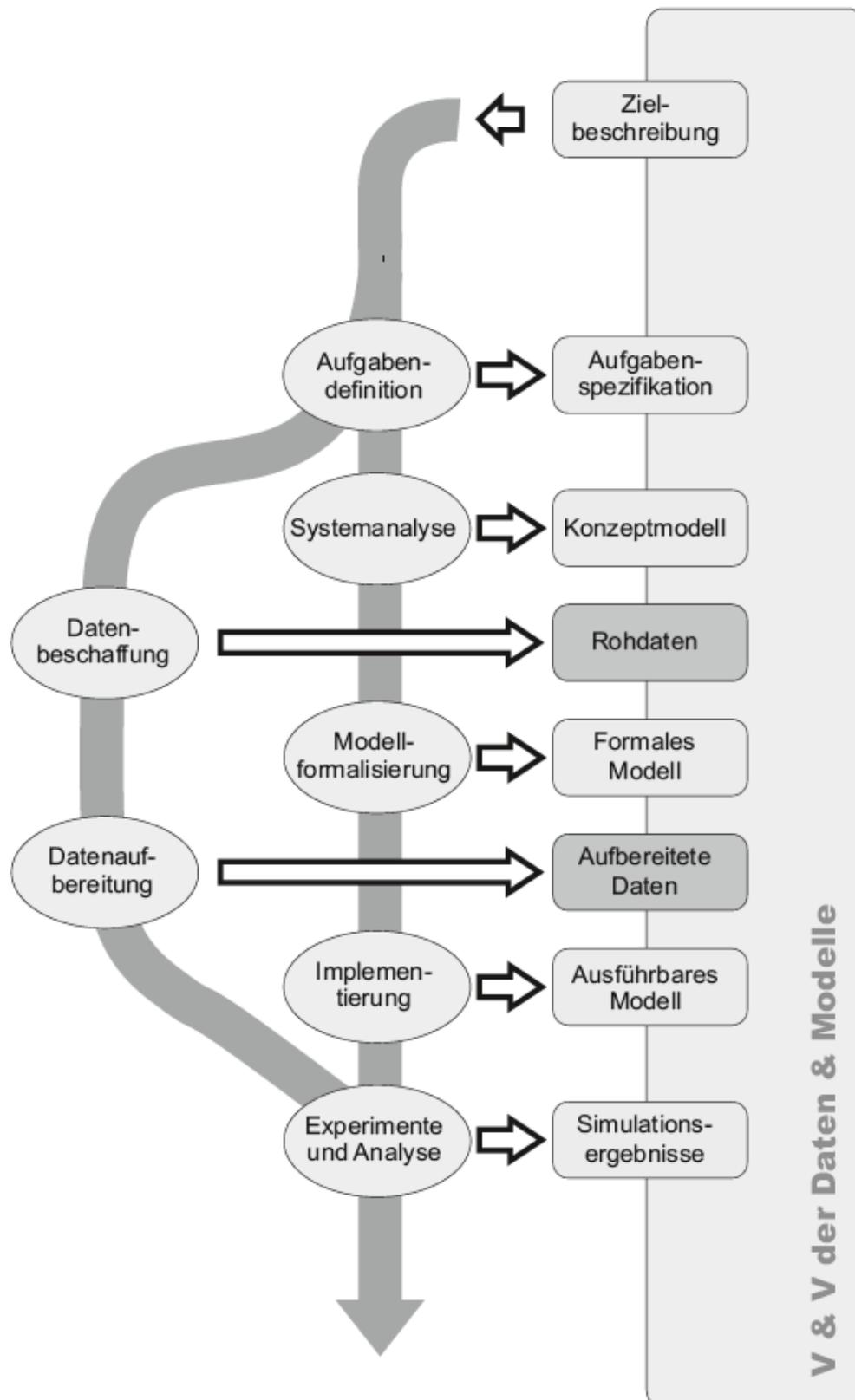


Abbildung 3-5: Vorgehensmodell Simulation nach ASIM [Rabe et al. 2008, S.5]

Das Vorgehensmodell geht von einer vorliegenden Zielbeschreibung aus, vorgelagerte Aufgaben, wie z.B. die Recherche von Problemlösungstechniken (vgl. Vorgehensmodell Simulation nach Balci 1989), werden hier nicht berücksichtigt. Der erste Schritt bei einer Simulationsstudie ist also die Aufgabendefinition. Es fällt auf, dass jeder Schritt in einem Phasenergebnis mündet, was dieses Modell von den vorher diskutierten Vorgehensweisen abhebt. Aus der Aufgabendefinition ergibt sich die Aufgabenspezifikation. Als nächstes soll das System analysiert und daraus ein Konzeptmodell erstellt werden. Danach soll ein formales Modell entwickelt werden, welches nach Implementierung von aufbereiteten Daten im späteren Verlauf zu einem ausführbaren Modell wird. Die Datenerhebung und -aufbereitung erfolgt bei dem Vorgehensmodell nach ASIM parallel und unabhängig von der Erstellung der ersten beiden Modellstufen. Die vollständig nutzbare Datenstruktur wird also erst zur Erstellung des ausführbaren Modells benötigt. Nach der Implementierung folgen dann die Experimente und die finale Analyse, welche dann die eigentlichen Simulationsergebnisse liefern. Bei Betrachtung des Modells fällt sofort auf, dass Verifikation und Validierung einen im Hintergrund befindlichen, durchgängigen Vorgang darstellen und nicht, wie in anderen Modellen, lediglich als Abschluss der Implementierung eines Modells verstanden wird. Letzteres ist nach wirtschaftlichen Aspekten nicht sinnvoll, denn je später ein Fehler entdeckt wird, desto mehr Kosten hat er bereits verursacht. Dies gilt auch bei der Erstellung von Simulationsstudien. V&V soll im Hintergrund jeder Phase ausgeführt werden, damit bei jedem Ergebnis einer Phase Fehler direkt ausgemerzt werden. Sie begleitet die Studie so lange, bis das Modell als „vollständig korrekt“ angesehen wird. Das Vorgehensmodell nach ASIM wurde für die Studie ausgewählt, weil es der Verifikation und Validierung einen angemessenen Betrachtungsrahmen verleiht, so dass auch angesichts mangelnder Erfahrung in der Durchführung von Simulationsstudien mit großer Wahrscheinlichkeit sichergestellt werden kann, dass die Simulation nicht zu falschen Rückschlüssen führt oder gar ein der Problemstellung unangemessenes Modell erstellt wird.

3.5 Vorgehensweise der Verifikation und Validierung nach Rabe et al. 2008

Zum Zwecke eines angemessenen Betrachtungsrahmens soll sich die Struktur der V&V in der Studie in Kapitel 6 an dem Vorgehensmodell der V&V aus Rabe et al. 2008 orientieren. Abbildung 3-6 zeigt das Modell, welches an das Simulationsvorgehensmodell aus Abschnitt 3.4 angepasst ist:

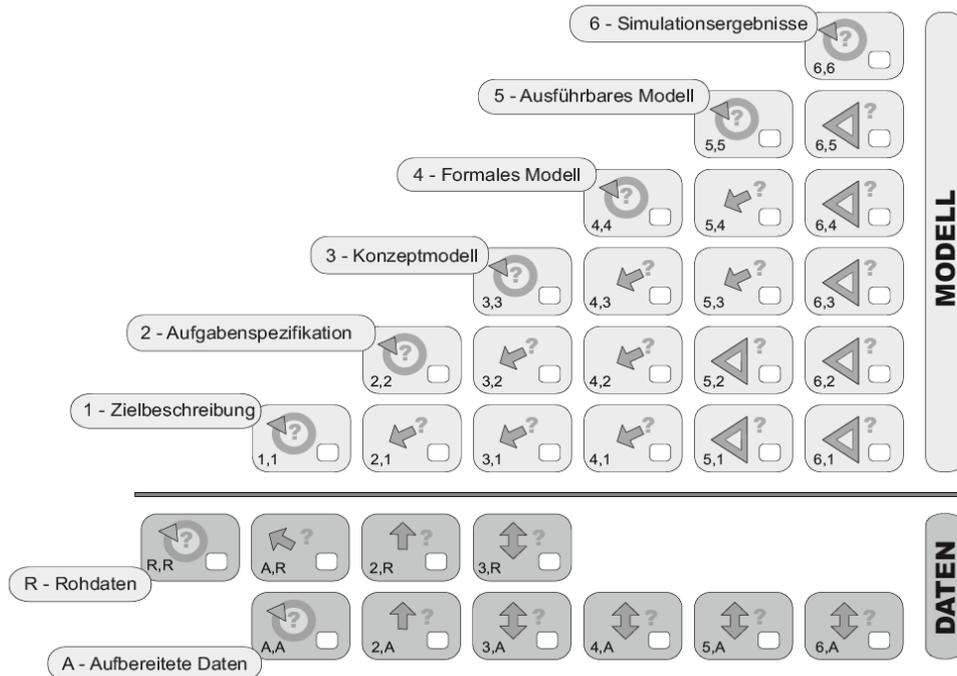


Abbildung 3-6: Vorgehensmodell zur V&V für die Simulation in Produktion und Logistik nach Rabe et al. 2008 [S.119]

Es beschreibt für jedes Phasenergebnis die notwendigen V&V-Schritte. Man kann im Modellabschnitt vier verschiedene Typen von V&V erkennen:

Tabelle 3-1: Typen von V&V-Elementen

Symbol	Bezeichnung	Erläuterung
	Kreis	Symbolisiert einen Selbstbezug (intrinsisches V&V-Element)

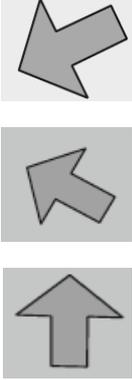
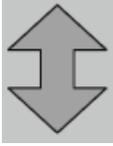
	Einfacher Pfeil	Symbolisiert die Prüfung eines Phasenergebnisses in Bezug auf ein vorheriges, der Pfeil gibt die Bezugsrichtung an, kann auch für die Prüfung stehen, ob Rohdaten bzw. aufbereitete Daten der Aufgabenspezifikation entsprechen
	Dreieck	Symbolisiert die Prüfung eines Phasenergebnisses mit einem anderen unter Bezugnahme auf die aufbereiteten Daten
	Doppelpfeil	Symbolisiert wechselseitigen Bezug der Phasenergebnisse und aufbereiteten Daten

Tabelle 6-1: Typen von V&V-Elementen

Der erste Index eines jeden Elements beschreibt das Phasenergebnis, welches mit der jeweiligen V&V-Technik überprüft wird. Der zweite Index deutet auf das Phasenergebnis, das als Bezug für die V&V genommen wird, hin. Der Kreis, der immer zwei gleiche Indizes aufweist, behandelt folglich eine intrinsische Prüfung. Das Schema lässt erkennen, dass bei der V&V der einzelnen Phasen alle vorherigen Phasen als Bezug herangezogen werden müssen.

Das V&V-Modell liefert also einen kausalen und bisweilen temporären Zusammenhang von V&V-Elementen und den Phasen einer Simulationsstudie. [Rabe et al. 2008]

Für die in dieser Arbeit durchgeführte Studie soll jedoch ein Tailoring, also ein individuelles Zuschneiden der Vorgehensweise, stattfinden. So soll für die Simulationsstudie in dieser Arbeit das Formale Modell wegfallen. Aufgrund der Anwendung von Dosimis-3, einer bausteinorientierten Simulationssoftware, können außerdem einige Aspekte der V&V entfallen bzw. vorausgesetzt werden, denn eine V&V der Funktionsweise der einzelnen Bausteine hat bereits seitens des Herstellers stattgefunden. Die Eignung der einzelnen Bausteine zum jeweiligen Zweck muss jedoch

mit Hilfe des Benutzerhandbuchs nachgewiesen werden. Die jeweils angewandten V&V-Techniken sollen in dieser Arbeit jeweils kurz erläutert und beschrieben werden. Sie sind oftmals selbsterklärend.

4 Maßnahmen und Verbesserungspotentiale der Elektronikfertigung des Pumpenherstellers unter besonderer Berücksichtigung der Lean-Production-Konzepte

In diesem Kapitel soll die Produktion der elektronischen Pumpenkomponenten mit ihren Hauptbereichen dargestellt und erläutert werden. Nachdem in Kapitel 2 Lean-Production-Konzepte, die als Grundlage der Werksumstrukturierung gelten, analysiert wurden, sollen im weiteren Verlauf Verbesserungspotenziale des aktuellen Produktionssystems anhand dieser aufgezeigt werden. Ein Teilprozess der Fertigung, das Wellenlöten, wird dann geplant und in einer Simulationsstudie detailliert erörtert und geplant. Das aktuelle Werk der Elektronikfertigung besteht hauptsächlich aus drei großen, miteinander verbundenen Hallen. Zur Vergrößerung des Werks wurde eine weitere Produktionshalle in unmittelbarer Nachbarschaft erworben.

4.1 Das aktuelle Produktionssystem

In diesem Abschnitt werden die Hauptbereiche der Elektronikfertigung näher beschrieben. Die Produktion wird dabei in vier Bereiche unterteilt.

4.1.1 Wareneingang/-ausgang und Bauteilvorbereitung

Der erste Bereich ist der Wareneingang/-ausgang. Hier werden alle gelieferten Bauteile entpackt und einer Sichtkontrolle sowie einer Zählung unterzogen. Im Groben werden für die Pumpenmodule drei Arten von elektronischen Bauteilen bearbeitet: Leiterplatten, SMD-Bauteile (surface-mounted device), also oberflächenmontierte Bauteile, und THT-Bauteile (through-hole technology), also bedrahtete Bauteile, die mittels Durchsteckmontage auf die Leiterplatten aufgebracht werden. Alle zu verschickenden Güter werden vakuumiert, verpackt und in LKW's geladen. Der Wareneingang ist eng verbunden mit der Bauteilvorbereitung (BaVo). Die BaVo ist, verteilt über alle drei Hallen dafür zuständig, alle Bauteile prozessgerecht vorzubereiten und einzulagern. Wareneingang und Bauteilvorbereitung stellen die größten Bereiche der logistischen Struktur der Elektronikfertigung dar. Abbildung 4-1 zeigt ein Organigramm der gesamten innerbetrieblichen Logistik:

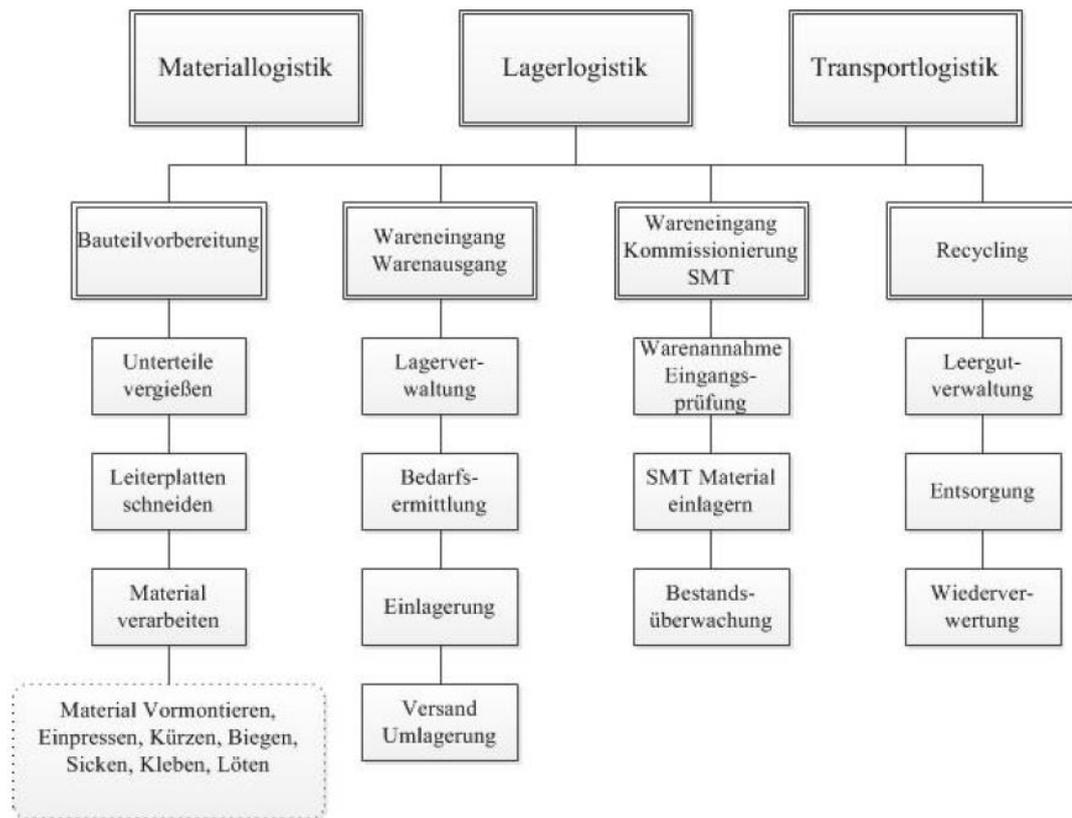


Abbildung 4-1: Organigramm der innerbetrieblichen Logistik [firmeninterne Darstellung]

Der Bereich des Recyclings wird hier nicht näher erläutert, da er keinerlei Relevanz für diese Arbeit aufweist. Die SMD-Bauteile werden auf Rollen angeliefert und von den automatischen SMT-Bestückern auch als solche verwendet. Daher werden diese Bauteile von den Mitarbeitern der BaVo nach dem Kommissionieren mit einem eigens für sie generierten Wilo-Label versehen und in einem Paternoster im Bereich 3 eingelagert. Die Leiterplatten werden im SAP verbucht und im Nutzen ebenfalls in Bereich 3 eingelagert. Die THT-Bauteile werden auf Rollen angeliefert, jedoch müssen diese zur weiteren Bearbeitung einzeln getrennt werden. Dafür benutzen die Mitarbeiter der BaVo Schneidemaschinen, wie in Abbildung 4-2 zu sehen ist:



Abbildung 4-2: Schneidemaschine der Bauteilvorbereitung [firmeninterne Fotografie]

Nach der Trennung der THT-Bauelemente werden diese nach Artikelnummern geordnet in Schäferkästchen gefüllt und im Bereich der BaVo in Halle 1 eingelagert. Die einzelnen Montagelinien werden dann nach dem Kanban-Prinzip von den Logistik-Mitarbeitern mit THT-Bauteilen versorgt.

4.1.2 SMT-Bereich

Nachdem die unbearbeiteten Leiterplatten nach Eingang eingelagert wurden, finden nun die ersten Arbeitsschritte im SMT-Bereich (surface-mount technology, dt.: Oberflächenmontagetechnik) statt. In der jeweiligen SMT-Linie werden die Leiterplatten zunächst mit einem Datamatrix-Code versehen, der durch einen Laser eingraviert wird. Der Datamatrix-Code (Abbildung 4-3) sorgt für eine eindeutige Identifizierbarkeit der Leiterplatten und dient der Datenerfassung während der gesamten Wertschöpfung.

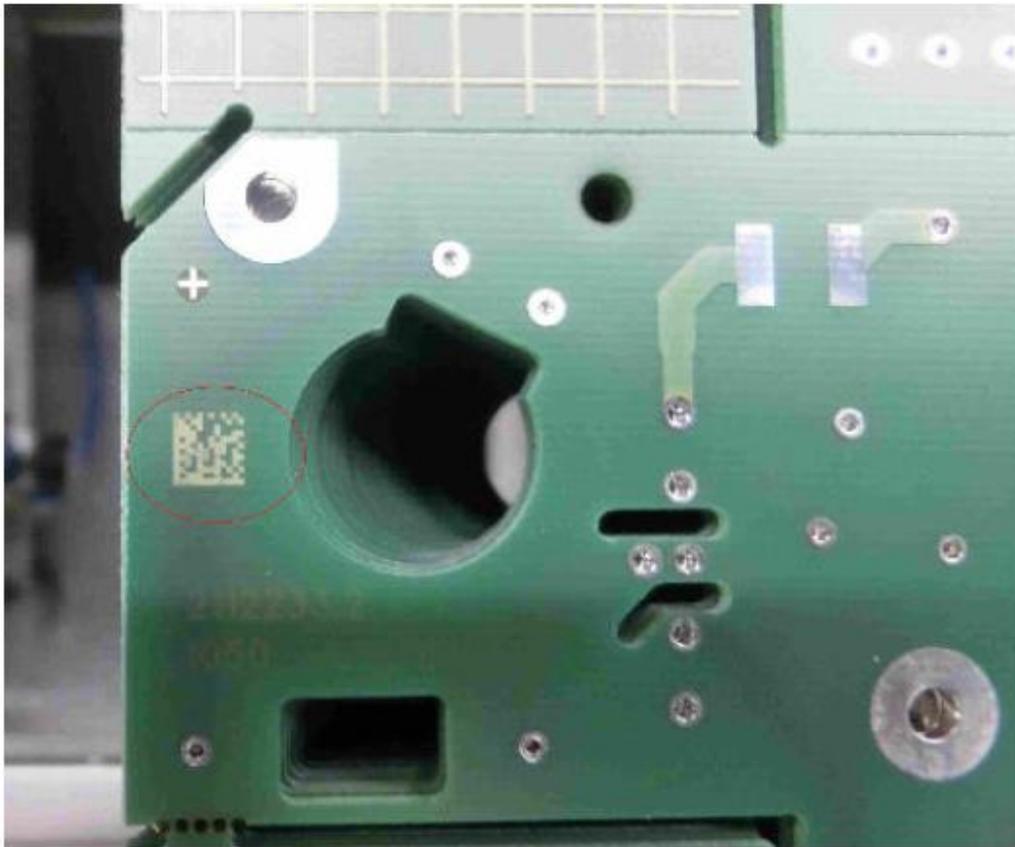


Abbildung 4-3: Leiterplatte mit eingraviertem Datamatrix-Code [firmeninterne Fotografie]

Der nächste Bearbeitungsschritt in der SMT-Linie ist das Aufbringen von Lotpaste. Dazu wird das Schablonendruckverfahren angewendet. Es wird mittels Siebdruckverfahren eine Schablone mit Aussparungen an den Anschlussflächen aufgetragen. In der dann folgenden SPI findet eine Lotpastenprüfung statt, bei der sowohl die Qualität der Lötstelle als auch die Lotpastendicke überprüft werden. Nun werden die einzelnen Bauteile vollautomatisch auf die Leiterplatten aufgebracht. Abbildung 4-4 zeigt einen Bestückautomaten mit Feedern:



Abbildung 4-4: SMT-Bestückautomaten mit Feedern [firmeninterne Fotografie]

Die Feeder werden mit den jeweils benötigten Bauteilrollen ausgestattet und versorgen den Bestücker mit Bauteilen. Er setzt sie an die richtige Stelle auf der jeweiligen Platine. Danach findet der eigentliche Lötprozess im Reflow-Ofen statt. Das Verfahren des Reflow-Lötens zeichnet sich durch das Wiederaufschmelzen der Lotpaste aus. Der letzte Schritt im SMT-Bereich ist die automatische optische Inspektion (AOI), also eine Prüfung auf Vollständigkeit der Bauteile und Qualität der Lötstellen. Deckt die Inspektion Mängel auf, so werden die betroffenen Platinen in einem naheliegenden Reparaturbereich nachgearbeitet. Baugruppen, bei denen große Anschlussflächen gelötet werden, müssen zusätzlich in regelmäßigem Abstand einer Röntgenanalyse unterzogen werden, um Lunker auszuschließen. Die Platinen im SMT-Bereich werden im Nutzen bearbeitet.

4.1.3 Nutzentrennzentrum

Zur weiteren Bearbeitung in den einzelnen Linien müssen die Platinen aus dem Nutzen getrennt werden. Dazu befindet sich in Halle 3 ein Nutzentrennzentrum. Es kommen verschiedene Trennverfahren zur Anwendung. Je nach Nutzenaufbau und Außenkontur der Leiterplatten kann manuell durch Brechen mit Hand, mit Hilfe einer Schlagschere oder durch eine automatische Säge- bzw. Fräseinrichtung (Abbildung 4-5) stattfinden.

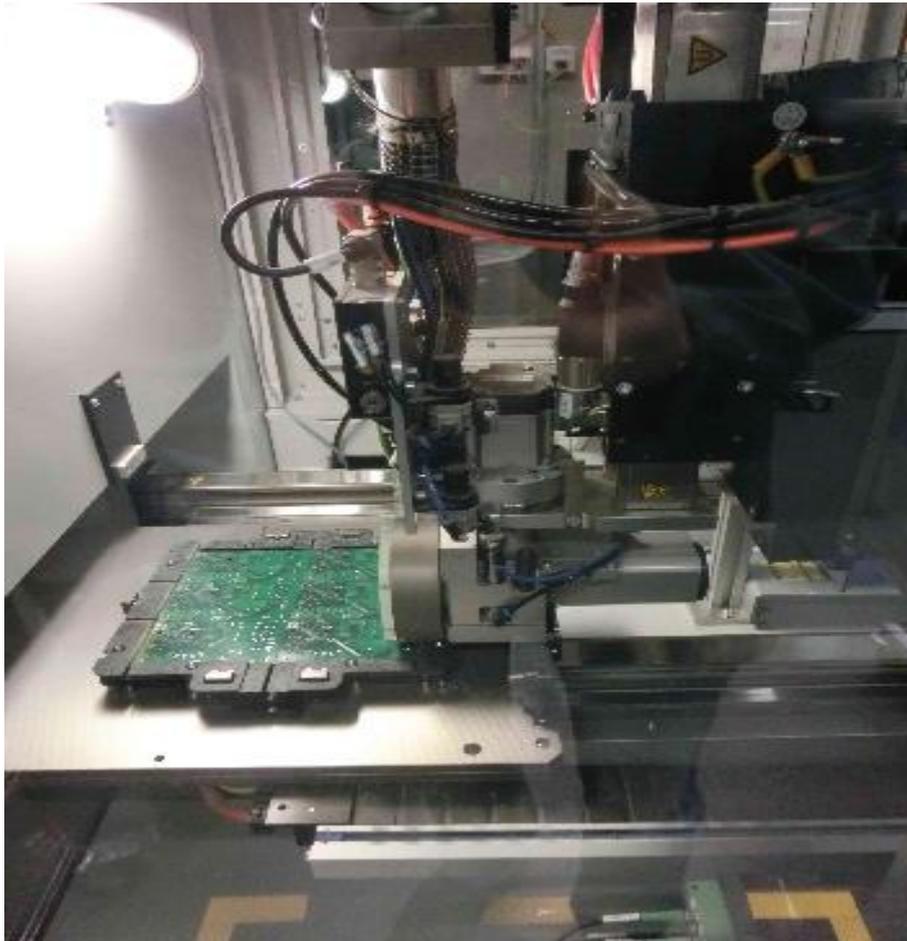


Abbildung 4-5: Sägeeinrichtung zum Trennen von Leiterplattennutzen [firmeninterne Fotografie]

Die getrennten Leiterplatten werden dann im Nutzentrennzentrum zwischengelagert, bevor sie nach dem FIFO-Verfahren zu den Bestück-/Endmontagelinien gefahren werden. Das First-In-First-Out-Prinzip ist in der Elektronikfertigung von großer Bedeutung, denn viele elektronische Bauteile weisen eine zeitlich begrenzte Verwendbarkeit auf.

4.1.4 THT-Bestückung, Löten und Endmontage

Die Fertigungshallen 2 und 3 bestehen zum größten Teil aus den Bestück-/ bzw. Endmontagelinien. Zentraler Punkt des Layouts der Produktion sind die Wellenlötanlagen (Bereich 5 und 6). Alle Fertigungslinien sind in U-Form aufgebaut und durch ein Transportband jeweils mit einer Wellenlötanlage verbunden. In den Linien werden die Platinen manuell mit THT-Bauteilen bestückt. Die Bestückung der Platinen der einzelnen Baugruppen weicht jeweils sehr voneinander ab, sodass nahezu alle Baugruppen in einer eigenen Linie gefertigt werden. Bestückähnlichkeiten werden in Abschnitt 5.3 erörtert. Die Leiterplatten werden vor der Bestückung in Lötrahmen

gelegt. Diese sind angepasst an die Größe des Transportbandes und gewährleisten eine korrekte Lötung. Abbildung 4-6 zeigt Leiterplatten in einem Lötrahmen und THT-Bauteile in Schäferkisten bei der Montage:



Abbildung 4-6: Leiterplatten in einem Lötrahmen bei der THT-Bestückung [firmeninterne Fotografie]

Nachdem alle Leiterplatten in dem jeweiligen Lötrahmen bestückt sind, wird dieser auf das Transportband gelegt und zur Wellenlötanlage transportiert. Der Prozess des Wellenlötens soll mit seinen gesamten Transportelementen in dieser Arbeit für den Werksumbau neu geplant und mit Simulation optimiert werden. Daher wird der aktuelle Ablauf im Folgenden anhand einer Lötanlage detailliert beschrieben. Abbildung 4-7 zeigt die Wellenlötanlage der Firma Ersa:



Abbildung 4-7: Wellenlötanlage der Firma Ersa [firmeninterne Fotografie]

Nach diesem Vorgang wird der Lötrahmen in die Senkstation gefahren und 30cm hinunter gefahren, um dort im Rücklauf gekühlt zu werden. Nachdem der Lötrahmen aus der Anlage herausgefahren ist, fährt er auf dem Transportband den Weg zurück, wird am Ende der Strecke von einer Hebestation wieder auf die ursprüngliche Höhe zurückbefördert und kann dann vom jeweiligen Mitarbeiter der Linie abgenommen werden. Nach diesem Schritt folgt der *In-Circuit-Test* (ICT). Hier werden Parameter der einzelnen Bauelemente bzw. elektrische Verbindungen zwischen diesen geprüft. Das genaue Prüfverfahren ist baugruppenabhängig und soll daher hier nicht weiter behandelt werden. Wurde eine Platine vom Tester als funktionstüchtig erachtet, so wird sie endmontiert. In der Endmontage wird die Platine in das Modulgehäuse gelegt und verschraubt. Bei einigen Baugruppen werden vorher noch Hybride auf der Platine befestigt. Teilweise müssen die Gehäuse selbst vor der Endmontage noch vorbereitet werden.

4.2 Abgeleitete Maßnahmen und Verbesserungspotenziale unter besonderer Berücksichtigung der Lean-Production-Konzepte

Eine Recherche des Pumpenherstellers im Dezember 2014 hat ergeben, dass Komponenten im Durchschnitt ca. 65 Tage in Lägern verweilen, bis sie zu

Enderzeugnissen verarbeitet wurden. Eine Vision des Pumpenherstellers sieht es vor, die Bestände der Rohkomponenten auf 5 Tage, die Zwischenlager auf 1 Tag zu reduzieren. Das daraus resultierende, angedachte Konzept für die Elektronikfertigung soll in diesem Kapitel auf Lean-Production-Elemente heruntergebrochen werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird dann der Teilprozess des Wellenlötens unter Kriterien einer schlanken Prozessführung geplant und mit rechnergestützter Simulation im Anschluss analysiert.

Die Abteilung PPC (Production Planning and Controlling), die für die Produktionsplanung zuständig ist, bricht die langfristige Planung der Pumpenmodule auf einen Wochenplan hinunter und gibt diese an die Fertigungscoordination der einzelnen Fertigungsbereiche weiter. Die Koordinatoren entwickeln daraus einen Tages- bzw. Schichtplan, nach dem dann letztendlich gefertigt wird. Der größte Teil der produzierten Module wird dann vor der Endmontage der Pumpe eingelagert. Ein kleiner Teil des produzierten Guts wird direkt mit Hydraulik und Motor im Gehäuse verheiratet. Prozessanalytisch bedeutet das, dass die Pumpen und auch die Pumpenmodule selbst größtenteils im Push-Prinzip durch die Fertigung „gedrückt“ werden. Ein schlanker Materialfluss fordert die Steuerung der Prozesse nach dem Pull-Prinzip (Abschnitt 2.1). Man fertigt also nicht nach genauem Kundenbedarf sondern rein nach Prognose. Um eine Pull-Steuerung umsetzen zu können, müssen alle Pumpenkomponenten just-in-time (Abschnitt 2.3.2) produziert werden, denn sobald der Kundenauftrag eingeht, müssen die der Endmontage vorgelagerten Produktionseinheiten (Hydraulik-, Elektronik- und Motorenfertigung) koordinierte Bedarfszahlen bekommen, um just-in-time liefern zu können.

Die Umsetzung des Pull-Prinzips geht also zwangsläufig nicht ohne effektive, durchgängige Planung und Steuerung. Um eine ordnungsgemäße Einführung der Just-in-time-Produktion zu gewährleisten und zusätzlich Prozessabläufe weiter zu digitalisieren, kann z.B. ein *ERP-System* (Enterprise-Resource-Planing-System) in Verbindung mit einem *MES* (Manufacturing Execution System) auf Unternehmens- bzw. Betriebsleitebene) eingeführt werden. Das MES kann u.a. als Bindeglied zwischen ERP und Produktion fungieren. Eine damit mögliche vollständige Erfassung von Daten mittels Barcode oder *RFID* (Radio Frequency Identification) wäre ein weiterer Schritt zur vollständigen *Traceability* (zu Deutsch: Rückverfolgbarkeit).

Um eine Just-in-time-Logistik (ebenfalls Abschnitt 3.3.2) zu etablieren, müssten sowohl externe als auch interne Zulieferer mit entsprechenden Bedarfsangaben versorgt werden. Um die Bestände senken zu können, müssten die genauen Bedarfe dann (meistens) in einem höheren Takt angeliefert werden, was wiederum zur Folge hätte, dass alle vorgeschalteten Zulieferer ebenfalls just-in-time produzieren oder ihrerseits größere Bestände in Kauf nehmen müssten. Die Ablieferfrequenz der fertigen Module müsste

folgerichtig ebenfalls erhöht werden. Die aktuellen An- und Ablieferfrequenzen können aufgrund der Vielzahl an Artikeln nicht verallgemeinert angegeben werden, daher wäre eine genaue Ermittlung der aktuellen und neuen Liefertakte an dieser Stelle zu umfangreich. Die These, dass alle bzw. die meisten Frequenzen erhöht werden müssen, kann auch ohne genaue Ermittlung der Ist-Situation getroffen werden, denn aktuell wird jeder Artikel vor der Produktion mindestens einen Tag eingelagert.

Um die gesamte Produktion ganzheitlich zu optimieren werden das Pull-Prinzip und die Just-in-time-Philosophie oftmals mit einer Produktion im One-piece-flow (Abschnitt 3.3.1) verheiratet. Der OPF wird in den einzelnen Linien, in denen die Prozessschritte von der THT-Bestückung bis zum Verpacken der Module durchgeführt werden, bereits umgesetzt. Die U-förmige Ausrichtung der Fertigungszellen erlauben zudem kurze Wege, was eine verbesserte Ergonomie gegenüber geraden Fertigungslinien zur Folge hat. Aus Sicht eines schlanken Materialflusses ist dieser Bereich der Fertigung theoretisch nicht zu verbessern. Bei dem Werksumbau möchte man, entgegen der Lean-Production-Konzepte die THT-Bestückung und das IC-Testen von der Endmontage entkoppeln. Dies hat zur Folge, dass ein Puffer zwischen den beiden Bereichen aufgebaut werden muss und somit eigentlich verhinderbarer Lagerbestand aufgebaut wird. Der entscheidende Vorteil liegt allerdings in der erhöhten Flexibilität der Mitarbeiter. Aktuell muss jeder Mitarbeiter einer Linie alle Bearbeitungsschritte durchführen können. Das hat dazu geführt, dass das Anlernen neuer Mitarbeiter sehr zeit- und kostenintensiv ist. Bedingt durch die saisonabhängigen Schwankungen der Produktionszahlen bedeutet dies, dass Produktionsplanungen erschwert werden und Variabilität kaum möglich ist, denn kurzfristige, externe Arbeitskräfte können kaum in Prozesse eingearbeitet und bestehende Mitarbeiter nur langsam in weitere Montagelinien integrieren werden. Eine firmeninterne Abwägung hat ergeben, dass die Flexibilität der Mitarbeiter an dieser Stelle vor einer Bestandsminimierung und Durchlaufzeitverkürzung Priorität erhalten soll.

Ein weiterer Baustein der Lean Production ist die Kaizen-Mentalität (Abschnitt 2.4). Der Kaizen-Gedanke soll einen ständigen Verbesserungsprozess fördern. Jeden Morgen findet eine sogenannte *Gemba-Runde* statt. Dabei sind Fertigungs- und Schichtleiter sowie die jeweils verantwortlichen Qualitätsmanager, Prozessingenieure und Prozessplaner anwesend und diskutieren kurzfristige Produktionsprobleme vor Ort und erörtern Lösungen. Folglich finden aktuell nur kurzfristige Maßnahmen zur ständigen Verbesserung der Montageprozesse Anwendung. Im SMD- und BaVo-Bereich wird bisher kein bewusstes Streben nach stetiger Verbesserung forciert. Um in der gesamten Produktion ständige Optimierungen zu erreichen, werden *Kaizen-Praktiker* sowie *Kaizen-Coaches* benötigt, die ihr methodisches Wissen weitergeben. Es könnten beispielsweise Schicht- und Bereichsleiter so geschult werden, dass sie in der Lage sind,

diese Aufgaben zu übernehmen. Des Weiteren sollten Kennzahlen generiert werden, die eine Verbesserung bzw. Verschlechterung in einem festgelegten, regelmäßigen Intervall von z.B. einem Monat aufzeigen. Bisher gibt es lediglich Produktions- und Qualitätskennzahlen, die den Status der aktuellen Periode angeben, nicht aber die vorherigen Perioden dazu in Relation stellen. Eine genauere Generierung einer oder mehrerer neuer Kennzahlen würde den Rahmen dieser Arbeit allerdings erheblich überschreiten. Ein weiterer Weg zu einem Grundgedanken der Verbesserung könnte ein Prämiensystem für Mitarbeitervorschläge sein. Es könnte z. B. halbjährlich der beste Verbesserungsvorschlag mit einer Geldprämie belohnt werden, so wären die Mitarbeiter in den Linien motivierter, autonom über eine Verbesserung nachzudenken.

Ein weiterer Schritt zur vollständigen Eliminierung von Verschwendung ist die Weiterentwicklung der traditionellen Instandhaltung zu einer Total Productive Maintenance. Die TPM wird, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, von drei Säulen getragen. Die erste Säule, der Ansatz einer Totalen Anlageneffizienz, wird aktuell in der Elektronikfertigung des Pumpenherstellers durch das Process Engineering beobachtet. Deuten die Kennzahlen dort auf eine Abnahme der Effizienz hin, so wird eingegriffen. Die zweite Säule, die Totale Mitarbeiterbeteiligung, wird bislang nicht vollends umgesetzt, denn Reparaturarbeiten werden ausschließlich von dem Instandhaltungsteam unternommen. Anlagenbetreuer werden bei der Problemsuche und -behebung nur bedingt miteinbezogen. Hier könnte man also verbessern, indem man jeweils Teams aus Instandhaltung und Anlagenbetreuer bzw. Schichtleiter bildet. Zur dritten Säule, der Totalen Anlagenerhaltung, gehört, neben einem vollständigen Instandhaltungsplan, welcher bereits vorhanden ist, der Gedanke der Instandhaltbarkeitsverbesserung. Diese Grundidee sollte besonders bei einer Fabrikplanung von großer Bedeutung sein, denn bisher sind aus Platzgründen nicht alle Maschinen bzw. Anlagen so platziert, dass Instandhaltungsarbeiten ohne großen Aufwand ausgeführt werden können. Es sind im Laufe der Zeit immer mehr neue Anlagen und Maschinen hinzugefügt worden, so dass mittlerweile an vielen Stellen Platzmangel herrscht und einige Maschinen keinen einfachen Zugang für Wartungen haben, so z.B. die Paternoster im Bereich der Bauteilvorbereitung. Eine einwandfreie Zugänglichkeit aller Maschinen sollte eine Maxime bei der Layout-Erstellung des gesamten neuen Werkes und auch der Lötanlagen mit den angrenzenden Arbeitsplätzen in dieser Arbeit sein. Ein weiteres in dieser Arbeit zu beachtendes Konzept der Lean Production ist die die Auslastungsglättung auf dem Weg zu einer vollständigen Produktionsnivellierung (Abschnitt 2.2). Die Auslastungen der drei Lötanlagen sollen in der Simulationsstudie (Kapitel 6) geglättet werden.

5 Entwicklung des neuen Lötprozesses

In diesem Kapitel soll zunächst die Grobauslegung des Lötprozesses stattfinden. Dazu bedarf es zunächst einer Analyse des Ist-Zustandes und der gewünschten Veränderungen. Danach sollen weitere Restriktionen erläutert werden, die sich z.B. durch Räumlichkeiten oder Wünsche der Projektleitung bzw. des Managements ergeben. Abschließend soll dann ein Layout in Microsoft Visio konstruiert werden, woraus sich u.a. Abmessungen, die zur Erstellung des ausführbaren Modells als Parameter benötigt werden, ergeben.

5.1 Ist-Analyse des Prozesses

Aktuell findet das Wellenlöten in zwei Produktionshallen statt. Jede Halle verfügt über eine Lötanlage, die über Transportbänder mit den einzelnen Fertigungslinien verbunden ist. Die Monteure bestücken die Platinen mit THT-Bauteilen in den Fertigungslinien und legen sie dann in Lötrahmen auf das Transportband, welches die Lötrahmen samt Platinen am Ende der Strecke durch ein Wellenlötbad fährt. Nachdem Löten werden die Rahmen mittels einer Senkstation eine Etage tiefer transportiert. Dort fahren die Rahmen durch eine Kühlzone und anschließend den ganzen Weg wieder zurück. Eine Hebestation am Ende des Bandes bringt die Lötrahmen wieder auf die obere Ebene, welche wiederum zu den Fertigungszellen führt. Hebt ein Mitarbeiter aus der Montage seinen Lötrahmen nach dem Löten nicht direkt vom Transportband ab, so fährt dieser erneut in Richtung Lötbad. Ein Mechanismus am Rahmen sorgt dann dafür, dass der Rahmen mit den Platinen vor dem Lötbad stoppt und nicht erneut gelötet wird. Es entsteht ein Stau bis der zuständige Mitarbeiter seinen Rahmen vom Band nimmt und die Platinen weiterverarbeitet. Es gehen je nach Baugruppe unterschiedlich viele Platinen in einen Lötrahmen. Die Abbildungen 5-1 und 5-2 zeigen die Lötanlagen mit ihren Fertigungs-linien:



Abbildung 5-1: Lötanlage 1 mit Fertigungszellen



Abbildung 5-2: Lötanlage 2 mit Fertigungszellen

Nach dem Löten wird die Platine im One-Piece-Flow erst einem ICT unterzogen und dann endmontiert. Die neue Prozessvision sieht einen harten Einschnitt zwischen THT/ICT-Bereich und Endmontage vor. Das bedeutet, dass beide Bereiche entkoppelt in unterschiedlichen Hallen verortet werden soll. Im zu erstellenden Layout der Fer-

tigungslinien sollen also nur THT-Montageplätze, IC-Teststände und ein Materialpuffer für erfolgreich getestete Leiterplatten dargestellt werden.

5.2 Die Arbeitsplätze der Linien

In diesem Abschnitt sollen die Arbeitsplätze der einzelnen Linien kurz vorgestellt werden. Wie bereits hinlänglich beschrieben, findet vor dem Löten die Montage von THT-Bauteilen statt. Nach dem Löten sollen zukünftig die Lötrahmen in ihren Fertigungszellen automatisch ausgeschleust werden. Bisher geschieht dies noch nicht. Abbildung 5-3 zeigt beispielhaft den THT-Montagearbeitsplatz der Baugruppe 1-4 als Shape in Microsoft Visio:

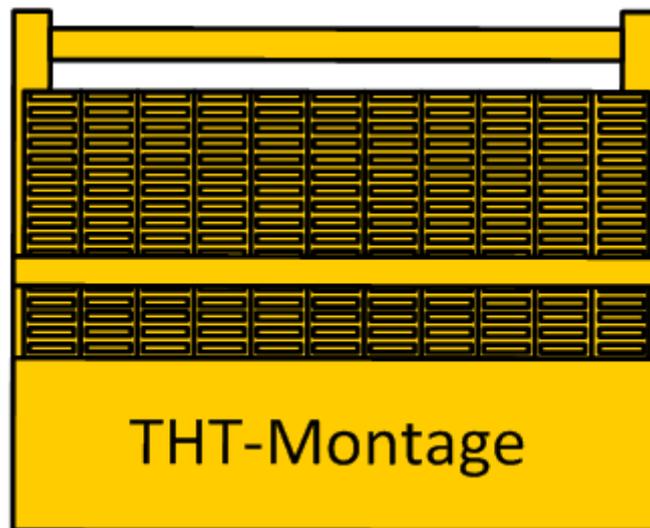


Abbildung 5-3: THT-Montagearbeitsplatz der Baugruppen 1-4 als Shape in Microsoft Visio [firmeninterne Darstellung]

Nach dem Ausschleusen werden aktuell noch die Lötrahmen manuell vom Band genommen und IC-getestet. Abbildung 5-4 zeigt den ICT der Baugruppen 1-4 als MS-Visio-Shape:

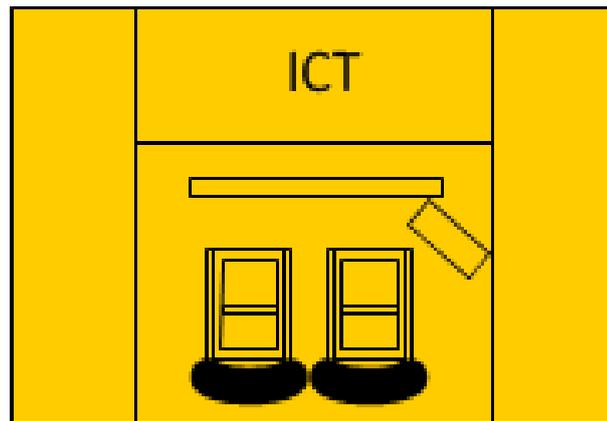
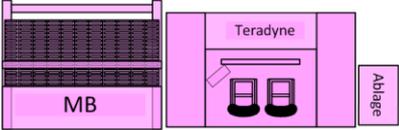
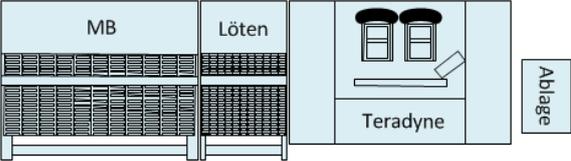
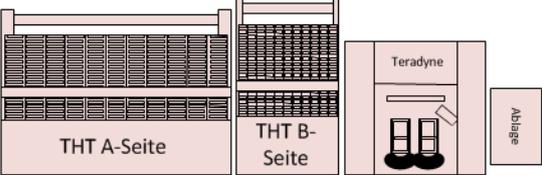
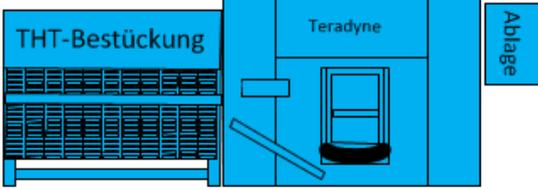
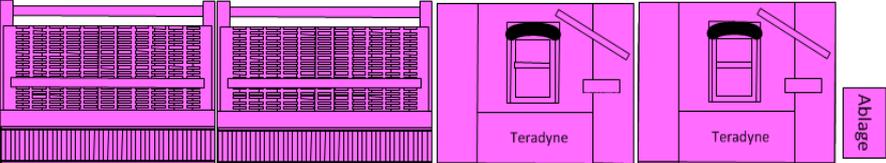
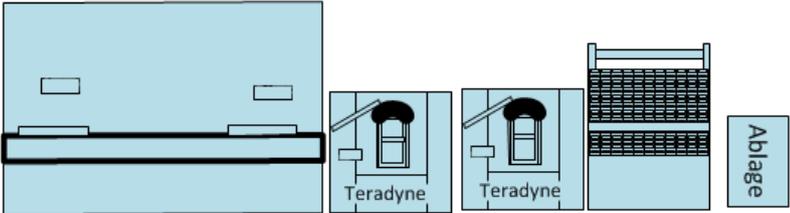
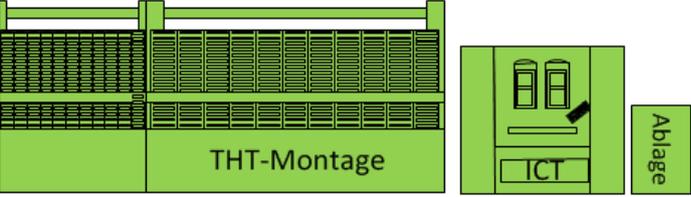
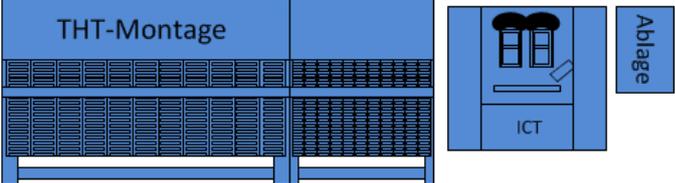


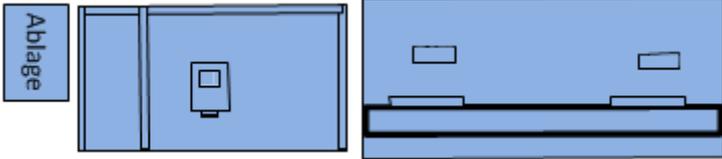
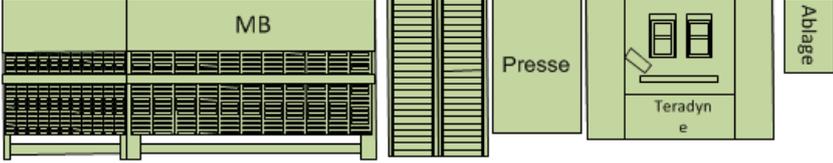
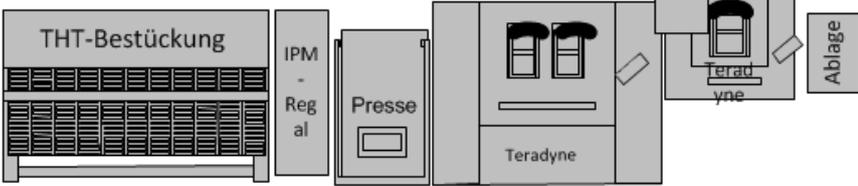
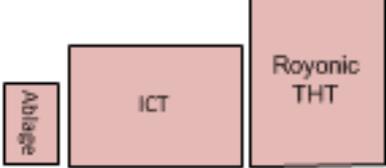
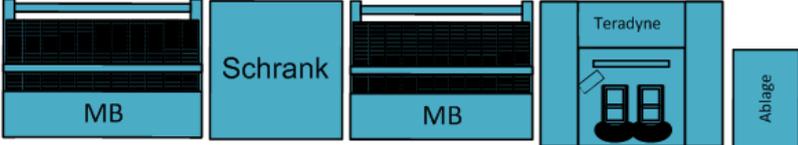
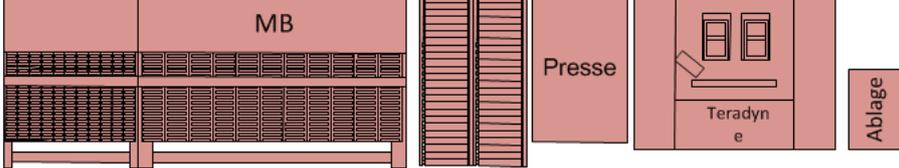
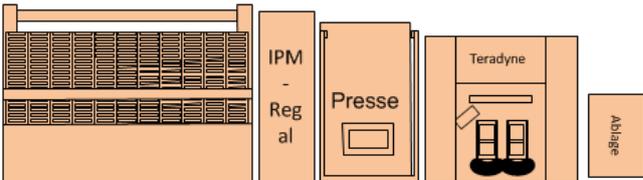
Abbildung 5-4: Großer Arbeitsplatz mit 2 IC-Testern als Shape in Microsoft Visio
[firmeninterne Darstellung]

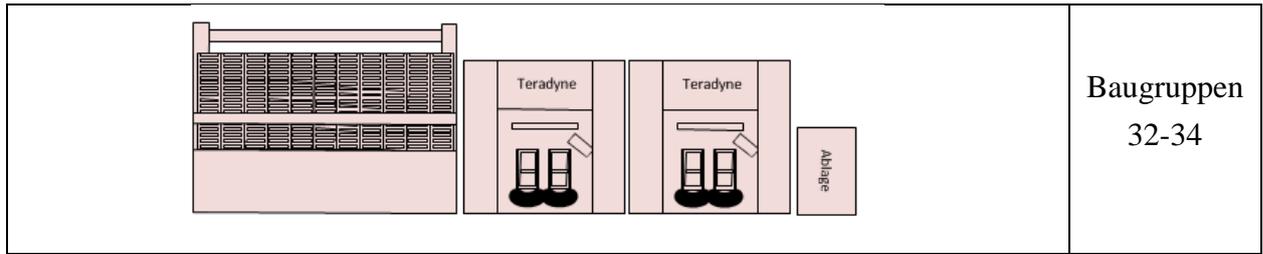
Bei einigen Baugruppen sind zusätzlich noch Press- bzw. Lötplätze vorgesehen. Auf diese Arbeitsplätze soll aber im Weiteren nicht eingegangen werden, da es sich hierbei um seltene Randprozesse handelt. Bei nahezu allen Linien sind die Arbeitsplätze individuell angepasst, daher kommt es zu optischen Abweichungen. Die Prozesse sind jedoch überall gleich. Tabelle 6-1 zeigt alle Fertigungslinien, entkoppelt von der Endmontage, schematisch als MS-Visio-Shapes [firmeninterne Darstellungen, nicht maßstabsgetreu]:

Tabelle 5-1: Die Arbeitsplätze der einzelnen Fertigungslinien entkoppelt von der Endmontage

	<p>Baugruppen 1-4</p>
	<p>Baugruppen 5+6</p>
	<p>Baugruppe 7</p>

	<p>Baugruppe 8</p>
	<p>Baugruppe 9</p>
	<p>Baugruppen 10+11</p>
	<p>Baugruppe 12</p>
	<p>Baugruppen 13+14</p>
	<p>Baugruppe 15</p>
	<p>Baugruppe 16</p>
	<p>Baugruppe 17</p>

	<p>Baugruppen 18+19</p>
	<p>Baugruppen 20+28</p>
	<p>Baugruppen 21-23,29</p>
	<p>Baugruppe 24</p>
	<p>Baugruppe 25</p>
	<p>Baugruppe 26</p>
	<p>Baugruppen 27+30</p>
	<p>Baugruppe 31</p>



Die meisten IC-Tester sind von der Firma *Teradyne*, einige Montagearbeitsplätze sind mit *MB* (Manuelle Bestückung) gekennzeichnet.

5.3 Restriktionen

In diesem Abschnitt sollen die Restriktionen dargestellt werden. Einige von Ihnen ergeben sich aus der Prozessvision bzw. stammen von der Projektleitung. Andere wiederum sind durch die Räumlichkeiten oder den Arbeitsschutz bedingt. Tabelle 5-1 fasst alle Restriktionen zusammen und gibt detaillierte Informationen:

Tabelle 5-2: Die Restriktionen für den neuen Lötprozess

Restriktion	Bedingt durch	Detaillierte Beschreibung
Ausschleusungen des Transportbandes	Prozessvision (Automatisierung)	Jede Linie soll im Zuge einer Automatisierung über eine Ausschleusung verfügen. Das Transportband ist dann in der Lage, Lötrahmen, die das Lötbad passiert haben, automatisch mit Hilfe von RFID-Erkennung an der jeweiligen Linie auszuschleusen. Es soll angenommen werden, dass die Ausschleusungen jeweils maximal drei Lötrahmen aufnehmen können. Die Ausschleusungen sollen 3,2m lang und 52,5cm breit sein.
Größe der Halle	Räumlichkeiten	Das Wellenlöten soll künftig in Halle 3 stattfinden. Die Fertigungshalle begrenzt naturgemäß das Transportband der Lötanlage. Die Größe der Halle beträgt 51,75m x

		30,70m. Dazu müssen oben und unten Wege vorgesehen werden, die 1,2m (reiner Fußgängerweg) bzw. 1,8m (Weg für Hallenfahrzeuge) breit sein sollen. Links in der Halle befinden sich ein Supermarkt für Leiterplatten nach dem Nutzentrennen mit dazugehörigen Wegen und ein Sanitätsraum. Supermarkt und Sanitätsraum belegen die gesamte linke Seite der Halle und ragen 14,6m in die Halle hinein. Sie sollen nur exemplarisch eingezeichnet werden.
Abstand der Arbeitsplätze von den Ausschleusungen	Arbeitsschutz	Der Abstand der Ausschleusungen von den Montagearbeitsplätzen muss mindestens 1,2m betragen
Abstand hinter den Arbeitsplätzen	Arbeitsschutz	Der Abstand hinter THT-Bestückplätzen muss mindestens 1m betragen, damit diese von hinten mit Schüttgut befüllt werden können.
Mindestabstand der Ausschleusungen	Ergibt sich aus den oberen beiden Punkten	Der Abstand zweier Ausschleusbänder muss mindestens $2x$ [Abstand der Arbeitsplätze von den Ausschleusungen] + $2x$ [Arbeitsplatzbreite] + [Abstand hinter den Arbeitsplätzen], insgesamt ca. 6m betragen.
Ein größerer Lötöfen	Vorgabe der Projektleitung/ des Managements	Der neue Lötöfen hat eine höhere Kapazität an Lötrahmen pro Schicht, daher haben sich Management und Projektleitung für den Kauf entschieden. Der neue Lötöfen hat eine Länge von 7,2m (vgl. alte Lötöfen: 5,7m.)
Wartungszugang für die Lötanlagen	Technische Eigenschaften der Lötanlagen	An beiden Seiten des Lötöfens muss aus Wartungsgründen 1,5m Platz freigehalten werden.

Länge der Ausschleusbänder		Zum Zeitpunkt dieser Arbeit kann noch keine genaue Aussage darüber gemacht werden, wie lang die Ausschleusbänder sein werden. Es soll für die Zeichnung zunächst von 3,2m ausgegangen werden. Für die Simulationsstudie soll angenommen werden, dass die Strecke 3 Lötrahmen puffern kann.
Aktives Buffering	Prozessvision (Automatisierung)	Im Zuge einer weiteren Automatisierung soll ein aktives Buffering, also ein automatisches Puffern von Lötrahmen stattfinden. Dazu werden vor allen Lötbädern Sondersenkstationen installiert, die, falls die Pufferung der drei Lötrahmen in den Ausschleusungen nicht ausreicht, ankommende gelötete Rahmen auf die untere Ebene des Transportbandes senken. (Es ergibt sich technisch gesehen eine Warteschleife, die keinen Einfluss auf andere Lötrahmen hat.) So kann kein bereits gelöteter Rahmen das Lötbad blockieren. Vor dem Lötbad gestoppte Rahmen üben außerdem einen hohen Druck auf die Antriebsketten des Transportbandes aus. Das soll zukünftig verhindert werden.
Prototypen + System Control Unit	Vorgabe der Projektleitung/ des Managements	Es sollen, neben den THT-/ICT-Plätzen der Baugruppen 1-30, eine Linie für Prototypen und eine Linie für die System Control Unit der Baugruppen 27-29, einer Zusatzplatine, die stückzahltechnisch den Baugruppen 27-29 entspricht.

Anzahl der Lötanlagen	Vorgabe der Projektleitung/ des Managements	Das Löten soll künftig auf 3 Lötanlagen verteilt werden, da 2 Lötanlagen (wie aktuell verwendet) mit den neuen und alten Produkten kapazitiv wahrscheinlich überfordert wären.
Bestückähnlichkeiten	Technische Eigenschaften der Baugruppen	<p>(wie bereits in Abschnitt 5.2 gezeigt, hier der Vollständigkeit halber erneut aufgeführt)</p> <p>Die Montage- und ICT-Arbeitsplätze für der folgenden Baugruppen sind aus technischen Gründen (Bestückähnlichkeiten) zusammengelegt, um Platz zu sparen:</p> <p>Baugruppen 1-4, Baugruppen 5+6, Baugruppen 10+11, Baugruppen 13+14, Baugruppen 18+19, Baugruppen 20+28, Baugruppen 21-23, 29, Baugruppen 27+30 Baugruppen 31-34</p>
THT/ICT-Arbeitsplätze	Prozessvision	Es müssen alle THT-Montagearbeitsplätze und alle IC-Testarbeitsplätze an die Lötanlagen angeschlossen sein und an jeder Linie sollte genug Platz für getestete Baugruppen (aufbewahrt in KLTs der Größe 400x600) vorgesehen werden.

5.4 Das Layout der Anlagen

Das Layout wurde in Microsoft Visio mit vorhandenen Shapes erstellt. Die Struktur der Fertigungslinien ist bis auf Randprozesse in einigen Linien gleich. Die Maße der einzelnen Montage- bzw. Testplätze sind unterschiedlich. Sie entsprechen in dem Layout maßstäblich den realen Systemen. Anhang A zeigt das entworfene Layout der zukünftigen Halle mit einer beispielhaften Aufteilung der Baugruppen auf die drei Lötanlagen als MS-Visio-Zeichnung in DIN A3 im Maßstab 1:106:

Man sieht links den Supermarkt (blau) mit Wegen (grau). In diesem Supermarkt sollen, wie bereits erwähnt, die im Nutzentrennzentrum getrennten Platinen jeder Baugruppe vor dem THT-Bestücken eingelagert werden. Der Supermarkt wurde so dimensioniert, dass er eine Tagesproduktionsmenge getrennte Leiterplatten jeder Baugruppe lagern kann. Zwischen den einzelnen Supermarktregalen und um den Supermarkt herum befinden sich Wege von 1,8m Breite, die von schmalen Fahrzeugen befahren werden. Der Hauptweg befindet sich im unteren Teil der Halle. Dort sind die Wege mindestens 2,6m breit, damit Gabelstapler dort problemlos fahren können. Der obere Teil der Halle muss ausschließlich für Wartungszwecke begangen werden, daher reicht hier eine Breite von 1,2m. Aus Platzgründen mussten die Transportbänder kurz vor den Lötanlagen um 90° abgelenkt werden. Die Lötanlagen stehen folglich quer in der Halle. So wurde in vertikaler Richtung Platz gespart. Das Abknicken der Transportbänder hat zur Folge, dass Eckumsetzer angeschafft werden müssen, die die Lötrahmen einziehen, umsetzen und wieder an das Transportband abgeben. Die Umsetzer können beispielsweise bei der Firma Ersä bestellt werden, von der die gesamten Peripherien der Lötanlage stammen. Des Weiteren wurde hier eine mögliche Aufteilung der Baugruppen auf die drei Stränge vorgenommen. Die Aufteilung ist aus räumlicher Sicht gut umsetzbar, gilt aber nicht als endgültige Version. Die Simulationsstudie in Kapitel 7 soll Aufschluss über eine optimale Einteilung geben. Als fix anzusehen ist allerdings die jeweilige Anzahl an Ausschleusungen an den Wellen. So verfügt Welle 2 über 5 Ausschleusungen, die Wellen 1 und 3 nur über jeweils 3. Es können also an Welle 2 10 THT/ICT-Linien angeschlossen werden, an die Wellen 1 und 3 nur jeweils 6. Es werden insgesamt 20 Linien benötigt, so dass an Welle 1 und 3 jeweils nur 5 Linien angeschlossen werden, um den räumlichen Gegebenheiten entgegen zu kommen.

6 Simulationsgestützte Analyse des Lötprozesses

Im Rahmen eines Werkumbaus soll das Produktionssystem neu strukturiert werden. Daher sollen alle Prozesse überdacht bzw. optimiert werden. Diese Studie soll sich mit dem Wellenlöten befassen und Aufschluss über einige mit statischen Mitteln nicht lösbare Problemstellungen geben. Das Wellenlöten ist einer der Kernprozesse der Produktion, denn die Lötanlagen sind taktgebend für vor- bzw. nachgelagerten Prozesse und sollen daher in dieser Arbeit analysiert werden.

Es wird davon ausgegangen, dass der Leser dieser Arbeit mit den Funktionalitäten der hier verwendeten Software DOSIMIS-3 Version 7.0 vertraut ist. Eine genaue Beschreibung des Simulationstools würde den Rahmen dieser Arbeit bei Weitem übersteigen. Es sei daher an dieser Stelle auf die Vorlesungs- und Übungsunterlagen zu „Grundlagen der Simulationstechnik“ vom Fachgebiet „IT in Produktion und Logistik“ im Rahmen des Moduls „Modellierung und Simulation in Produktion und Logistik“ und auf das DOSIMIS-3-Benutzerhandbuch verwiesen. Die Simulationsstudie wird nach dem in Abschnitt 6.4 erörterten Vorgehensmodell durchgeführt. Die V&V-Elemente der einzelnen Phase werden jeweils am Ende jedes Abschnittes zusammengefasst erläutert. Alle Teilbereiche der V&V, die sich ausschließlich auf die Durchführung von Simulationsstudien durch externe Dienstleister beziehen, finden keine Beachtung in den nachfolgenden Abschnitten. Es wird in Einzelfällen darauf verzichtet, die ausgelassenen Punkte zu erwähnen.

6.1 Zielbeschreibung der Studie

In der Studie sollen verschiedene Problemstellungen gelöst werden. Die Funktionsweise der Lötanlagen samt Peripherien ist Kapitel 5 zu entnehmen. Im Sinne einer Produktionsnivellierung wird eine gleichverteilte Auslastung der drei Lötanlagen angestrebt. Die Simulation kann nicht kreativ eigene Lösungen vorschlagen, sie kann lediglich Szenarien durchspielen und Kennzahlen zu diesen ausgeben. Folglich muss also ein Szenario, das nach statischen Berechnungen im Sinne der Auslastungsglättung zunächst sinnvoll erscheint, ausgewählt und simuliert werden. Sollten die durchschnittlichen Auslastungen der drei Wellen nicht in etwa gleich sein, so sollen Korrekturen am System vorgenommen werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Überprüfung der Möglichkeit von Stückzahlerhöhungen ohne maschinelles Aufrüsten. Die Stückzahlenentwicklungen der letzten Jahre des Pumpenherstellers waren von kontinuierlichen Steigerungen geprägt. Die prognostizierten Zahlen für 2016 enthalten bereits wieder eine Erhöhung (im Vergleich zu 2015), jedoch möchte man auch für den Fall einer erneuten Erhöhung gerüstet

sein. Die Studie soll also die Auswirkungen einer großflächigen Stückzahlerhöhung aufdecken. Dazu müssen die Stückzahlen in einzelnen Simulationsexperimenten etappenweise gesteigert werden, um vom System nicht abbildbare Fälle aufzudecken. Eine moderate Erhöhung der Stückzahlen sollte von den Anlagen auf jeden Fall zu bewältigen sein.

Die Realität des aktuellen Produktionssystems hat gezeigt, dass nicht immer nach Plan produziert werden kann. Das hat zur Folge, dass gelegentlich ein Mitarbeiter aus einer Fertigungslinie in eine andere versetzt wird, damit man dort bestimmte Teile schneller produzieren kann. Es handelt sich hierbei also, bezogen auf den Teilprozess des Lötens, um eine reine Umverteilung der menschlichen Ressourcen. Dies kommt in der Realität zur Anwendung, wenn eine kurzfristige Erhöhung der Abliefermenge stattfindet und/oder ein Bereich aus verschiedenen Gründen stückzahltechnisch deutlich weiter fortgeschritten ist als ein anderer. Der Produktionsprozess sollte so ausgelegt sein, dass eine kurzfristige Umverteilung ohne Komplikationen durchführbar ist.

Des Weiteren soll die Studie die Notwendigkeit des Aktiven Bufferings im Zuge einer erweiterten Automatisierung erörtern. Beim Aktiven Buffering werden einerseits die Ausschleuser so programmiert, dass sie bei vollständig belegtem Ausschleusband ankommende fertige Lötrahmen weiter auf dem Transportband belassen, und andererseits wird die Sondersenkstation vor der Lötanlage so eingestellt, dass sie nicht nur bei Stau im Lötbad selbst eingreift, sondern auch erneut ankommende Rahmen abfängt und auf das von der Lötanlage wegführende Band schleust. Weil für den Prozess aber schon Ausschleusungen geplant sind, die jeweils drei gelötete Rahmen an ihren Linien puffern, ist zu erörtern, ob das Aktive Buffering überhaupt notwendig ist. Es wird erwartet, dass die Station erst eingreifen muss, wenn die Mitarbeiter die Rahmen regelmäßig zu spät zur weiteren Bearbeitung vom Band abnehmen.

Die Zielbeschreibung stellt laut dem angewandten Simulationsvorgehensmodell das erste zu betrachtende Phasenergebnis dar. Folglich kann nur die intrinsische Prüfung stattfinden. Ein „Schreibtischtest“ hat ergeben, dass in der Zielbeschreibung zwar Punkte aus der als Vorlage für die Studie genommenen Dokumentation nach Rabe et al. 2008 fehlen, diese aber in Bezug auf den vorliegenden Fall kaum sinnvoll sind. Des Weiteren wurden die erwarteten Ergebnisse hier nur jeweils kurz angedeutet, damit die Zielbeschreibung hauptsächlich darauf ausgerichtet werden kann, als Grundlage für die Entwicklung der Aufgabenspezifikationen zu fungieren.

6.2 Aufgabenspezifikation

Die Aufgabenspezifikation soll zunächst für eine Vervollständigung der Zielbeschreibung sorgen. Es sollen für den weiteren Verlauf der Studie aus den Zielen die konkreten Aufgaben abgeleitet werden.

Aus dem ersten Ziel, durch geschickte Aufteilung der Baugruppen über die drei Stränge die Auslastungen zu glätten, müssen im Vorfeld der Simulation einige Überlegungen angestellt werden. Es soll zunächst eine Ausgangssituation hergestellt werden, bei der Baugruppen so auf die Lötanlagen aufgeteilt werden, dass nach statischen Berechnungen eine annähernd gleiche durchschnittliche Auslastung auf allen drei Strängen vorliegt. Zu beachten ist hierbei besonders, dass an die Lötanlagen 1 und 3 jeweils 5 Linien und an Lötanlage 2 10 Linien angeschlossen werden müssen, wie in Abschnitt 5.4 erörtert worden ist. Die Ergebnisse des Experiments müssen dann unter besonderer Berücksichtigung der Belegungen und Durchsätze der relevanten Anlagen analysiert werden. Der Endzustand dieses Experiments/dieser Experimente soll als Grundlage für alle weiteren Versuche gelten.

Ein weiteres Ziel dieser Studie ist die Erforschung, inwieweit Stückzahlen erhöht werden können. Hierzu sollen Experimente unter den zuvor erörterten Randbedingungen der geglätteten Aufteilung und optimalen Transportgeschwindigkeiten durchgeführt werden. Es sollen Erhöhungen um 15%, 25% und 50% abgebildet werden. Falls das Produktionssystem früh Probleme aufweist, müssen die nächsten Erhöhungen nicht mehr durchgeführt werden.

Die nächste Aufgabe befasst sich mit einer kurzfristigen Umverteilung der menschlichen Ressourcen. Es sollen das Umsetzen einer Arbeitskraft von einer Linie in eine andere genauer beleuchtet werden. Es soll also ein Experiment initiiert werden, bei dem die Arbeitskraft umverteilt wird. Es wird davon ausgegangen, dass im Regelbetrieb in jeder Linie mit einem Mitarbeiter gearbeitet wird. In dem Experiment soll der extremste Fall einer möglichen Umverteilung, also der Worst Case beleuchtet werden. Das bedeutet, es wird zu der Linie, in der pro Schicht die meisten Platinen bestückt werden, eine Arbeitskraft hinzugefügt, die von der Linie, in der die wenigsten Platinen pro Stunde bestückt werden, abgezogen wird. Diese Umverteilung der Arbeitskraft hat prozesstechnisch zur Folge, dass die Stückzahl der einen Linie verdoppelt wird, wohingegen in der abgebenden Linie keine Platine mehr bestückt wird. In der Realität sind die Arbeitsplätze so ausgelegt, dass ein Umsetzen eines Mitarbeiters räumlich kein Problem darstellt. Die Versuche an dem System werden dann mit den abgeänderten Stückzahlen durchgeführt. Sollte das Szenario von dem System abbildbar sein, ohne das Verhältnis von Durchsätzen der Lötbäder zu Soll-Stückzahl stark negativ zu beeinflussen, so ist daraus, auch aufgrund der zuvor implementierten, geglätteten Aus-

lastung aller drei Anlagen, zu folgern, dass alle anderen möglichen Umverteilungen ebenfalls unproblematisch sind.

Um die Notwendigkeit einer Senkstation und das damit verbundene Aktive Buffering zu erörtern, sollen Experimente am Modell durchgeführt werden, bei denen die Mitarbeiter die Lötrahmen erst unter regelmäßigem Zeitverzug zur weiteren Bearbeitung abnehmen. Es soll hier davon ausgegangen werden, dass die Abnahme eines Rahmens konsequent alle 10min erfolgt.

Für die Experimentierbarkeit ist es wichtig, dass die Quellen und Senken des Systems, also der Eintritt bzw. Austritt der Objekte in den Prozess bzw. aus dem Prozess heraus, parametrisierbar sind. Dosimis-3 erlaubt von Haus aus eine Objektgenerierung nach verschiedenen Verteilungen. In allen Betrachtungen wird vorausgesetzt, dass die Lötrahmen, also der Verbund von jeweils mehreren bestückten Leiterplatten, gleichmäßig über eine Schicht verteilt auf das jeweilige Transportband gelegt werden. Es handelt sich hierbei also um eine getaktete Verteilung. Laut der Einschätzung der jeweiligen Schichtleiter spiegelt dies die reale Verteilung hinreichend genug wider. Unterschiede zur Realität sind meist bedingt durch die individuelle Handhabung eines Monteurs und daher im Einzelnen nicht abbildbar. Weil das Testing und jede weitere Tätigkeit nach dem Löten nicht relevant für die Betrachtungen sind, sollen die Objekte das System nach vollständigem Transport des Bandes inklusive Ausschleusung an der entsprechenden Fertigungslinie in Senken verlassen. Um Aufschluss über das Aktive Buffering zu erhalten, muss nicht zusätzlich eine Variante konstruiert werden, die bei vollständig belegten Ausschleusungen fertige Lötrahmen auf dem Transportband zirkulieren lässt. Die Zustände können auch anhand der Staubildung hinter den Ausschleusungen ausreichend bewertet werden. Eine Erhöhung der Stückzahlen und das Zufügen eines weiteren Mitarbeiters zu einer Linie sind, bezogen auf die Simulation, ähnlich, denn die Quelle wird lediglich über die Menge der einzuschleusenden Objekte definiert und die steigt in beiden Fällen. Lediglich die Höhe des Anstiegs kann unterschiedlich sein. Beim Hinzufügen eines Mitarbeiters soll davon ausgegangen werden, dass die Arbeitsplätze genügend Kapazitäten aufweisen.

Um die Parametrisierung der einzelnen Bausteine korrekt durchführen zu können, werden verschiedene Datensätze benötigt. Für die Simulation sind die Produktionszahlen für 2016, vor allem die der High-Season im September und Oktober, von Relevanz. Aus zeittechnischen Gründen müssen Planzahlen von 03/2016 verwendet werden. Diese werden auf eine Schicht heruntergebrochen und den Quellen in Form von Taktzeiten zur Verfügung gestellt. Weil es keine verlässlichen Aussagen dazu gibt, wann genau während einer Schicht Lötrahmen mit bestückten Platinen auf das Transportband gelegt werden, eine Zeitaufnahme dessen sehr aufwendig und nicht ohne Genehmigung des Betriebsrates durchführbar ist, können diesbezüglich keine genaueren

Parametrisierungen stattfinden. Erschwerend kommt noch hinzu, dass jede Monteurin/ jeder Monteur einzelne Handhabungs- und Bearbeitungsschritte entgegen der Standards individuell ausführt und man dadurch keine Parametrisierung findet, die tatsächlich der Realität entspricht. Eine Approximation ist an dieser Stelle folglich unabdingbar. Firmenintern werden die Produktionsplanungsdaten in regelmäßigen Abständen aktualisiert. Der fixe Zeitrahmen dieser Arbeit erfordert es, dass besagte Planzahlen verwendet werden. Diese Daten werden von der Abteilung „Production Planing and Controlling“ bereitgestellt. Vor der Verwendung der Ergebnisse beim tatsächlichen Umbau zur Optimierung des Prozesses müssen die Daten daher erneut auf Aktualität geprüft werden. Sollten sie zu diesem Zeitpunkt veraltet sein, können die Ergebnisse der Studie höchstens als Abschätzungen dienen. Um in diesem Falle die Aussagen der Versuche zu verifizieren bzw. zu aktualisieren, müssten alle Experimente am Modell mit Hilfe der dann relevanten Daten erneut durchgeführt und ausgewertet werden. Die Aussagen in dieser Arbeit erheben aufgrund dessen nicht den Anspruch der Korrektheit bei zukünftigen Planungsänderungen bzw. Produktionsmengenanpassungen.

Die Längen der jeweiligen Transportbänder müssen der Visio-Datei, also der eigenen Auslegung des Prozesses entnommen werden. Teilweise können hier gerundete Werte angenommen werden. Ein weiterer Datensatz bezieht sich auf die möglichen Geschwindigkeiten der einzelnen Bänder. Hierzu werden Daten aus der Abteilung „Process Engineering“ benötigt. Diese wurden zuvor entweder beim Hersteller erfragt oder den Anlagenbeschreibungen entnommen. Aller Voraussicht nach können alle Bausteine in Dosimis-3 mit den Standard-Funktionen der Software abgebildet werden. Sollte dies im Rahmen der Experimente nicht der Fall sein, so steht eine Excel-Schnittstelle zur Verfügung, über die individuelle Parametrisierungen abgebildet werden können.

Die Aufgabenspezifikation wurde im Rahmen einer „Validierung im Dialog“ mit den verantwortlichen Prozessingenieuren und dem Technischen Leiter des Werks auf Korrektheit und Vollständigkeit geprüft. Die Modellnutzung ist ausschließlich während der Erstellung dieser Arbeit geplant. Theoretisch kann das Modell natürlich auch darüber hinaus genutzt werden. Die Vorgehensweise zur Lösungsbewältigung der einzelnen Aufgaben ist hinreichend begründet. Die Struktur der Daten wurde hinsichtlich ihrer Aktualität beschrieben. Alle Datensätze stammen direkt von den zuständigen Abteilungen und wurden ebenfalls im Dialog validiert. Die Datenapproximation, die dazu dienen soll, den Takt der Bestückung der Leiterplatten realistisch anzunähern, wurde als logisch und hinreichend beschrieben erörtert.

Eine Budgetplanung macht im Zusammenhang mit dem Zweck dieser Arbeit wenig Sinn und wurde daher nicht durchgeführt. Ein Dialog mit dem technischen Leiter des Werks hat ergeben, dass die Zeitplanung der Studie, welche durch den terminlichen

Rahmen dieser Arbeit (3 Monate) festgesetzt ist, als realistisch einzuordnen ist. Einen größeren Umfang sollte die Studie jedoch nicht haben. Die einzelnen Projektschritte wurden, soweit möglich, logisch aufeinander abgestimmt. Alle Daten- und Informationsquellen wurden hinsichtlich ihrer Vollständigkeit überprüft. Sollten unerwartet kurzfristig noch Informationen benötigt werden, so stehen jederzeit Ansprechpartner der einzelnen Abteilungen zur Verfügung.

Die Aufgabenspezifikation wurde direkt aus den einzelnen Zielbeschreibungen entwickelt und während der Validierung im Dialog als dem Untersuchungszweck entsprechend eingeordnet. Das bedeutet, dass die Grobplanung der Experimente, wie sie in der Aufgabenspezifikation stattgefunden hat, dem Zweck angemessen ist und hinreichend beschrieben wurde.

Der Lötprozess wurde in Kapitel 5 ausführlich beschrieben und im Rahmen der neuen Prozessvision angepasst. Im nächsten Abschnitt wird nochmals ein Funktionsschema zu diesem Prozess aufgestellt, das die Modellierung des Prozesses in Dosimis-3 begründen soll.

Für alle Experimente gilt, dass die Transportbänder jeweils die maximal mögliche Geschwindigkeit annehmen sollen.

6.3 Konzeptmodell

Das Konzeptmodell folgt aus den ersten Modellierungsschritten des abzubildenden Systems. In Kapitel 5 wurde bereits eine beispielhafte Darstellung des Systems vorgenommen. In diesem Abschnitt soll eine erneute Modellierung stattfinden, die als Vorstufe des Dosimis-3-Modells zum Verständnis dienen soll.

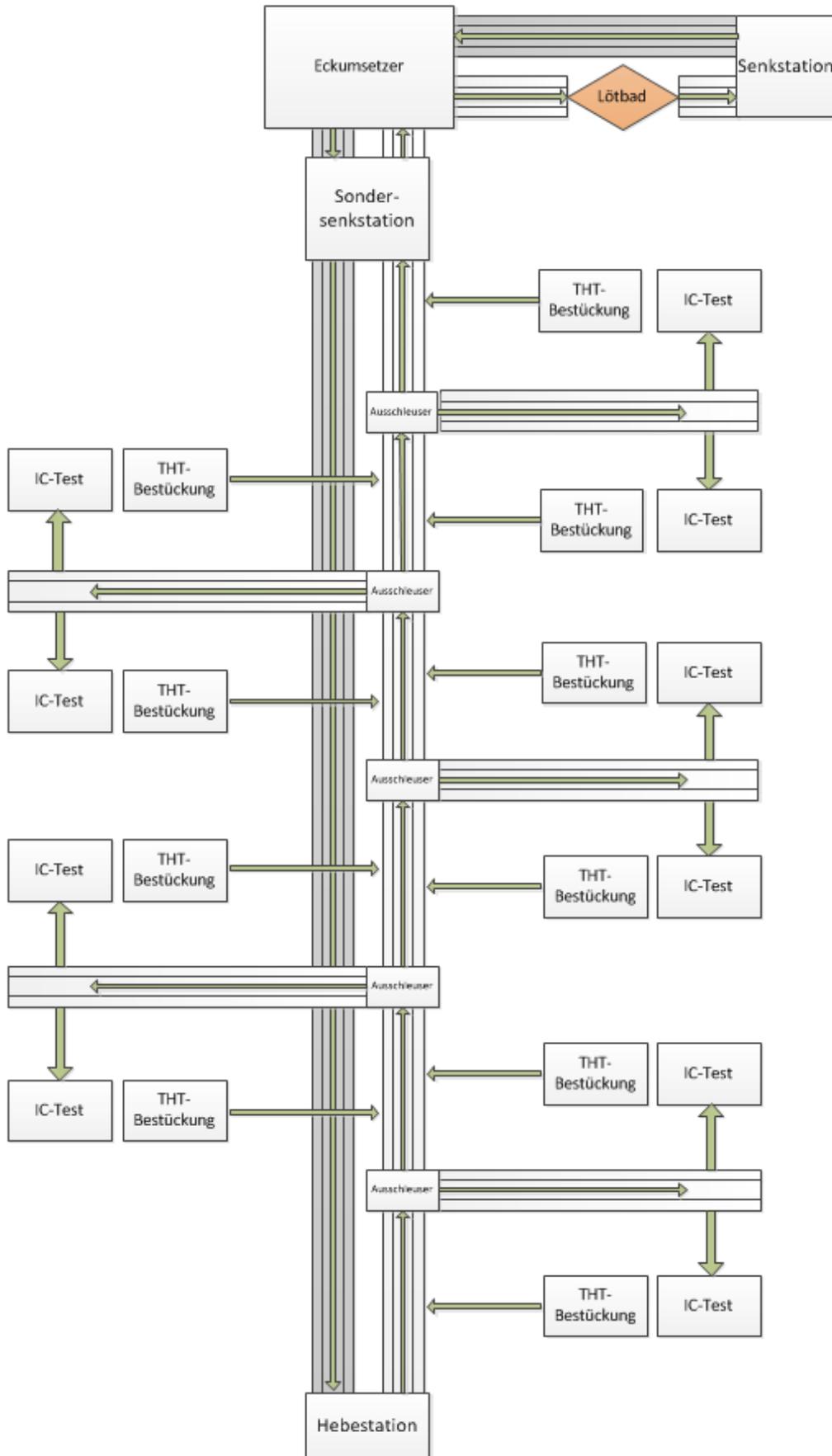


Abbildung 6-1: Das Konzeptmodell (Welle 2)

Abbildung 6-1 zeigt das Funktionsschema des Prozesses und konkretisiert die zu betrachtenden Zusammenhänge. Hier wurde Lötanlage 2 mit ihren Transportbändern und angeschlossenen Arbeitsplätzen gezeigt. Die anderen beiden Anlagen haben den gleichen Aufbau, verfügen lediglich über die Hälfte der angeschlossenen Arbeitsplätze. Sie werden deshalb hier nicht noch zusätzlich dargestellt. Die grünen Pfeile zeigen die Richtung des Materialflusses. Als Quellen des Systems können die THT-Bestückplätze verstanden werden. An diesen montiert der jeweilige Mitarbeiter einzelne THT-Komponenten mittels Durchstecktechnik auf die Leiterplatte. Hat die Monteurin/der Monteur eine bestimmte Anzahl an Leiterplatten vollständig bestückt, legt er sie in den dafür vorgesehenen Lötrahmen. Die Anzahl an Platinen, die ein Lötrahmen aufnehmen kann, variiert von Linie zu Linie. Genauere Angaben dazu befinden sich im Abschnitt „Rohdaten“. Die gefüllten Lötrahmen werden dann umgehend auf das Transportband der Lötanlage gelegt, damit die THT-Komponenten, die bis zu diesem Zeitpunkt nur in die Leiterplatte gesteckt sind, auf die Platine gelötet werden. Das Transportband führt von allen THT-ICT-Linien zur Lötanlage. Vorher werden die Lötrahmen noch durch eine Sondersenkstation hindurch transportiert und von einem Eckumsetzer um 90° gedreht. Diese Drehung ist der Hallenbreite geschuldet, wodurch die Lötanlage abgelenkt werden musste. Nachdem die Lötrahmen mit den bestückten Leiterplatten das Lötbad passiert haben, werden sie von einer Senkstation auf die untere Ebene des Transportbandes gefahren. Die untere Ebene des Bandes ist in dem Modell grau hinterlegt und wurde aufgrund der Zweidimensionalität graphisch parallel zur oberen angelegt. Die Lötrahmen fahren die gesamte Strecke auf der unteren Ebene zurück und werden dann von einer Hebestation am Ende des Bandes wieder auf die obere Ebene gehoben. Das Transportband führt dort wieder zu den einzelnen Linien. Ist ein Lötrahmen nun an seiner Linie angekommen, so greift der jeweilige Ausschleuser ein und führt den Lötrahmen auf die Staustrecke der jeweiligen Linie. Die Ausschleuser scannen bei jedem ankommenden Rahmen einen dort integrierten RFID-Chip, auf dem sämtliche Prozessschritte hinterlegt sind und können so entscheiden, welche Rahmen ausgeschleust werden und welche passieren sollen. Die Staustrecke im Anschluss kann jeweils 3 Lötrahmen aufnehmen. Die auf der Staustrecke verorteten Rahmen werden im nächsten Schritt vom zuständigen Mitarbeiter abgehoben und zum IC-Test transferiert. Sollten sich bereits drei Lötrahmen auf einer Staustrecke befinden und ein vierter zur Linie fahren, so soll dieser nicht ausgeschleust werden sondern erneut in Richtung Lötanlage fahren. Dort wird er vorher von der Sondersenkstation erfasst und vor einem erneuten Löten auf die untere Ebene des Bandes gefahren. Dieses Aktive Buffering wiederholt sich solange bis ein Rahmen der Linie aus der Staustrecke abgehoben wird. Der dann folgende IC-Test stellt das Ende des zu betrachtenden Systems dar und soll im Simulationsmodell als Senke modelliert werden.

Eine Validierung der Inhalte des Konzeptmodells hat zunächst durch einen Schreibtischtest stattgefunden. Weil dieser aber ohne Unterstützung von außen stattfindet, birgt er die Gefahr, dass die eigenen Fehler beim nochmaligen Durchgehen des Abschnittes nicht erkannt werden. Daher hat im Anschluss noch eine Validierung im Dialog mit dem technischen Leiter des Werks stattgefunden. Weder beim Schreibtischtest noch im Dialog wurden Schwächen des Konzeptmodells hinsichtlich Vollständigkeit, Korrektheit und Eindeutigkeit erkannt. Das Modell stellt eine hinreichende Basis für die nächsten Modellierungsschritte dar und kann mit den aufbereiteten Daten in Dosimis-3 problemlos zu einem ausführbaren Modell weiterentwickelt werden. Den einzelnen Maschinen und Anlagen des realen Systems müssen im nächsten Schritt der Modellbildung passende Bausteine aus der Software zugeteilt, welche dann mit Hilfe der aufbereiteten Daten parametrisiert werden. Das Konzeptmodell wurde im Dialog außerdem als verständlich beschrieben. Zur Validierung gegenüber der Aufgabenspezifikation wurde zunächst erörtert, inwieweit alle Systemkomponenten im Konzeptmodell vorhanden sind. Es wurden alle Systemkomponenten sowie Systemgrenzen treffend beschrieben. So wurde z.B. die Vorgabe, dass die THT-Bestückplätze die Quellen und die IC-Teststände die Senken des Systems darstellen sollen, beachtet. Des Weiteren wurde festgestellt, dass das Modell in Umfang und Detaillierungsgrad den Aufgabenspezifikationen angemessen konzipiert wurde. Das Konzeptmodell wurde außerdem gegenüber der Zielbeschreibung validiert. Im Zuge dessen wurde diskutiert, ob die Ziele der Simulationsstudie bei der Modellierung angemessen berücksichtigt wurden. Die Validierung im Dialog hat ergeben, dass davon auszugehen sei, dass das Modell alle zur Zielerreichung nötigen Zusammenhänge wiedergebe.

6.4 Rohdaten

Tabelle 6-1 zeigt die technischen Daten zu den Lötwellen und Transportbändern und sonstigen Peripherien:

Tabelle 6-1: Die technischen Daten zu den Lötwellen und dem Transportbändern

Transportabschnitt	Mögliche Geschwindigkeit	Kommentar
Vorlauf (ungelötete Rahmen) zum Lötbad hin	3m/min - 12m/min	Die Realität hat gezeigt, dass hier nur höchstens mit 6m/min gefahren werden kann, ansonsten können Bauteile auf der Platine

		umfallen!
Rücklauf (gelötete Rahmen) vom Lötbad weg	3m/min – 12m/min	Jede Geschwindigkeit ist möglich!
Hub-, Senk-, Sondersenkstation und Eckumsetzer	Können in der Geschwindigkeit an den Transport angepasst werden.	Es wird jeweils eine Zeit von 5 Sekunden pro Bewegung angenommen
Transport durch das Lötbad	1,2m/min (Welle 1,3) bzw. 1,3m/min (Welle 2) auf 5,7m bzw. 7,2m	Prozessbedingt keine andere Geschwindigkeit möglich!
Kühlung (gelötete Rahmen) im Rücklauf unter dem Lötbad	1,2m/min (Wellen 1,3) bzw. 1,3m/min (Welle 2) auf 5,7m bzw. 7,2m	Prozessbedingt keine andere Geschwindigkeit möglich!

Weitere wichtige Rohdaten sind die Stückzahlen und die Angaben, wie viele Platinen jeweils in einen Lötrahmen hineinpassen. Tabelle 6-2 zeigt die Daten:

Tabelle 6-2: Die Produktionsplanungsdaten

Baugruppen	Tagesproduktionsmenge	Anzahl Platinen pro Lötrahmen
1-4	200	2
5+6	300	1
7	1000	3
8	480	3
9	400	2
10+11	300	1
12	600	6
13+14	800	3
15	2200	9
16	2160	8
17	4050	8

18+19	100	4
20+28	300	2
21-23, 29	300	2
24	500	4
25	80	1
26	650	7
27+30	500	4
31	100	1
32-34	600	1

Alle weiteren Daten wurden aus den Restriktionen bzw. dem Layout der Anlagen abgeleitet. Die Längen der Transportabschnitte wurden hier jeweils auf 0,5m gerundet. Es wird die beispielhafte Baugruppenaufteilung aus Kapitel 5 zugrunde gelegt. Die Wellen 1 und 3 sind weitestgehend gleich aufgebaut. Tabelle 6-3 gibt einen Überblick über alle relevanten Maße:

Tabelle 6-3: Die Maße der Transportbandabschnitte und Lötanlagen

Element der Anlage	Länge [m]
Transportstrecke von Senkstation zu letzter Ausschleusung	4
Transportstrecke zwischen zwei Ausschleusungen auf Wellenstrang 1+3 (außer Ausschleusungen für Baugruppen 24, 25+26 und 15, 16+17)	6
Transportstrecke zwischen den Ausschleusungen für die Baugruppen 24, 25+26	3
Transportstrecke zwischen den Ausschleusungen für die Baugruppen 15, 16+17	4,5
Transportstrecke zwischen zwei Ausschleusungen auf Wellenstrang 2	3

Transportstrecke zwischen erstem Ausschleuser und Sondersenkstation	3
Transportstrecke zwischen Sondersenkstation und Eckumsetzer	1
Transportstrecke zwischen Eckumsetzer und Lötbad, zwischen Kühlstrecke und Eckumsetzer	1
Transportstrecke zwischen Lötbad und Senkstation, zwischen Senkstation und Kühlstrecke	1
Transportstrecke Rückführung zwischen Sondersenkstation und Hebestation Welle 1	20
Transportstrecke Rückführung zwischen Sondersenkstation und Hebestation Welle 2	21
Transportstrecke Rückführung zwischen Sondersenkstation und Hebestation Welle 3	18
Lötbad, Kühlstrecke (Welle 1,3)	5,7
Lötbad, Kühlstrecke (Welle 2)	7,2
Ausschleusbänder	3
Lötrahmen	0,5

Die Maße, bei denen nicht explizit erwähnt wird, für welchen Wellenstrang sie gelten, sind für alle drei Anlagen gültig.

Ein elementarer Bestandteil der V&V bezüglich der Rohdaten ist die Prüfung, ob tatsächlich alle zur Modellierung und Durchführung der Ergebnisse notwendigen Daten erfasst wurden. Diese intrinsische Prüfung wurde durch einen „Schreibtischtest“ durchgeführt. Alle Daten sind zwar vollständig und konsistent im Sinne des Verwendungszwecks, für Aktualität kann allerdings nicht garantiert werden, weil zum Zeitpunkt der Datenerfassung für diese Studie, wie bereits beschrieben, nur Planzahlen verwendet werden konnten, die regelmäßig aktualisiert werden. Prüfungen bezüglich der Generierung der Daten sind mit großem Aufwand verbunden und wären für diese Studie aufwandstechnisch nicht angemessen. Sie wurden nur insofern durchgeführt, als

dass mit den Mitarbeitern der zuständigen Abteilungen jeweils im Dialog die Datenbeschaffung erörtert wurde. Der Beschaffungsprozess wurde für alle Datensätze als plausibel hinsichtlich der Methodik angesehen.

6.5 Aufbereitete Daten

In diesem Abschnitt sollen die Rohdaten, die aufgenommen bzw. von den zuständigen Abteilungen zur Verfügung gestellt wurden, auf die Simulationsstudie angepasst werden. Es müssen lediglich die Tagesproduktionsmengen auf Lötrahmen pro Tag hinuntergebrochen werden und schlussendlich Taktzeiten berechnet werden, die für die Parametrisierung der Quellen verwendet werden können. Für die Berechnung der Taktzeit wurde eine Produktionszeit von 8 Stunden zugrunde gelegt. Pausen und Verteilzeiten werden nicht berücksichtigt, weil die Praxis gezeigt hat, dass die Lötrahmen pro Schicht über die Gesamtproduktionszeit annähernd gleichmäßig verteilt gelötet werden. Bei der Produktionsmenge je Schicht und den Lötrahmen pro Schicht wurde an einigen Stellen aufgerundet. Die Taktzeit wurde ebenfalls gerundet.

Tabelle 6-4: Die aufbereiteten Produktionsdaten

Baugruppen	Tagesproduktionsmenge (3-Schichtmodell)	Anzahl Platinen pro Lötrahmen	Produktionsmenge je Schicht	Anzahl Lötrahmen pro Schicht	Taktzeit [sec]
1-4	200	2	67	34	847
5+6	300	1	100	100	288
7	1000	3	334	112	257
8	480	3	160	54	533
9	400	2	134	67	430
10+11	300	1	100	100	288
12	600	6	200	34	847
13+14	800	3	267	89	324
15	2200	9	734	82	351
16	2160	8	720	90	320
17	4050	8	1350	169	170

18+19	100	4	34	9	3200
20+28	300	2	100	50	576
21-23, 29	300	2	100	50	576
24	500	4	167	52	554
25	80	1	27	27	1067
26	650	7	217	31	929
27+30	500	4	167	42	686
31	100	1	34	34	847
32-34	600	1	200	200	144

Die Abmaße der einzelnen Elemente der Lötanlage bzw. Transportstrecke wurden in der folgenden Tabelle aus den Rohdaten übernommen und um den Ort des Auflegens der bestückten Lötrahmen auf das Transportband ergänzt, welcher hier in Form der Entfernung der manuellen Zuführpunkte von den jeweiligen Ausschleusbändern angegeben ist.

Tabelle 6-5: Die aufbereiteten Maße der Transportbandabschnitte und Lötanlagen

Element der Anlage	Länge [m]/ Entfernung [m]
Transportstrecke von Senkstation zu Ausschleusung	4
Transportstrecke zwischen zwei Ausschleusungen auf Wellenstrang 1+3 (außer Ausschleusungen für Baugruppen 24, 25+26)	6
Transportstrecke zwischen den Ausschleusungen für die Baugruppen 24, 25+26	3
Transportstrecke zwischen zwei Ausschleusungen auf Wellenstrang 2	2,8
Transportstrecke zwischen Ausschleuser und Sondersenkstation	3,1
Transportstrecke zwischen	1,1

Sondersenkstation und Eckumsetzer	
Transportstrecke zwischen Eckumsetzer und Lötbad, zwischen Kühlstrecke und Eckumsetzer	1,1
Transportstrecke zwischen Lötbad und Senkstation, zwischen Senkstation und Kühlstrecke	1,25
Lötbad, Kühlstrecke (Welle 1,3)	5,7
Lötbad, Kühlstrecke (Welle 2)	7,2
Ausschleusbänder	3,2
Lötrahmen	0,5
Entfernung der manuellen Zuführpunkte der Lötrahmen auf das Transportband von den jeweiligen Ausschleusungen	1

Die restlichen Daten in der folgenden Tabelle werden unverändert aus den Rohdaten übernommen:

Tabelle 6-6: Die übernommenen Rohdaten

Transportabschnitt	Mögliche Geschwindigkeit [m/min]	Kommentar
Vorlauf (ungelötete Rahmen) zum Lötbad hin	3 – 12	Die Realität hat gezeigt, dass hier nur höchstens mit 6m/min gefahren werden kann, sonst kann können Bauteile auf der Platine umfallen!
Rücklauf (gelötete Rahmen) vom Lötbad weg	3 – 12	Jede Geschwindigkeit ist möglich!
Hub-, Senk-, Sondersenkstation und Eckumsetzer	Können in der Geschwindigkeit an den Transport angepasst werden.	

Transport durch das Lötbad	1,2 (Wellen 1 und 3) bzw. 1,3 (Welle 2) auf 5,7m bzw. 7,2m Länge	Prozessbedingt keine andere Geschwindigkeit möglich!
Kühlung (gelötete Rahmen) im Rücklauf unter dem Lötbad	1,2 (Wellen 1 und 3) bzw. 1,3 (Welle 2) auf 5,7m bzw. 7,2m Länge	Prozessbedingt keine andere Geschwindigkeit möglich!

In großen Simulationsprojekten kommt der V&V der aufbereiteten Daten eine besondere Bedeutung zu, denn diese Datensätze führen zusammen mit dem ausführbaren Modell unmittelbar zu den Simulationsergebnissen. Weil im Schritt von den Rohdaten zu den aufbereiteten Daten aber lediglich triviale Umrechnungen stattgefunden haben und der ein Teil der Rohdaten ohne Veränderung übernommen wurde, ist die V&V an dieser Stelle kurz gehalten worden. Sie beschränkte sich hier auf die Überprüfung der Taktzeiten der Arbeitsplätze, indem durch nochmaliges Durchgehen validiert wurde.

6.6 Ausführbares Modell

Das ausführbare Modell stellt eine Weiterentwicklung des Konzeptmodells und gleichzeitig das Endergebnis des Modellierungsprozesses dar. Dabei wurde das System mit Hilfe der Bausteine aus Dosimis-3 modelliert. Die einzelnen Bausteine samt Parametrisierung sind im Folgenden aufgeführt. Es wird hier beispielhaft die Parametrisierung für den ersten Versuch angegeben. Alle weiteren Veränderungen der Parametrisierungen im Zuge der Experimente werden im Abschnitt 7.7 näher erläutert. Alle nicht erwähnten Parameter entsprechen den Standardwerten der Dosimis-3-Software.

Tabelle 6-7: Die Parametrisierungen der Bausteine des ausführbaren Modells

Nummer	Typ	Parametrisierung
6	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 12; Losgröße: 1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 847
9	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 18,19; Losgröße: 1,1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 3200
38	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 17; Losgröße: 1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 170
48	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 27,30; Losgröße: 1,1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 686
49	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 26; Losgröße: 1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 929
53	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 21,22,23,29; Losgröße: 1,1,1,1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 576
63	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 20,28; Losgröße: 1; Getaktet;

		Taktzeit[sec]: 576
68	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 24; Losgröße: 1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 554
96	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 25; Losgröße: 1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 1067
102	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 31; Losgröße: 1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 847
289	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 15; Losgröße: 1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 351
290	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 9; Losgröße: 1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 430
291	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 10, 11; Losgröße: 1,1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 351
292	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 7; Losgröße: 1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 257
293	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 5,6; Losgröße: 1,1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 288
299	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 16; Losgröße: 1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 320
300	Quelle	Objektgenerierung in fester Reihenfolge; Objekttyp: 8; Losgröße: 1; Getaktet; Taktzeit[sec]: 533
23	Senke	getaktet; Taktzeit[sec]: 60
29	Senke	getaktet; Taktzeit[sec]: 60
50	Senke	getaktet; Taktzeit[sec]: 60
51	Senke	getaktet; Taktzeit[sec]: 60
100	Senke	getaktet; Taktzeit[sec]: 60
224	Senke	getaktet; Taktzeit[sec]: 60
284	Senke	getaktet; Taktzeit[sec]: 60
286	Senke	getaktet; Taktzeit[sec]: 60
288	Senke	getaktet; Taktzeit[sec]: 60
296	Senke	getaktet; Taktzeit[sec]: 60
297	Senke	getaktet; Taktzeit[sec]: 60
44	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
45	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
46	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
47	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
58	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
59	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
60	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
61	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
62	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
73	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2

	ecke	
74	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
75	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
77	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
80	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 3
81	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 5
87	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 6
88	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,2; Anzahl der Segmente: 3
89	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,2; Anzahl der Segmente: 3
90	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,2; Anzahl der Segmente: 3
91	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,2; Anzahl der Segmente: 3
93	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 3
95	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 42
99	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,2; Anzahl der Segmente: 3
104	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
141	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
145	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 3
202	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
203	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
207	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 3
208	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 5
218	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 3
223	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,2; Anzahl der Segmente: 3
239	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
242	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,02; Anzahl der Segmente: 15
266	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 40

	ecke	
267	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 6
268	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
269	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
270	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 7
271	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
272	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
273	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 36
274	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 6
275	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
276	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
277	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
278	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
279	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 8
280	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
281	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
283	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,2; Anzahl der Segmente: 3
285	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,2; Anzahl der Segmente: 3
287	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
294	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,2; Anzahl der Segmente: 3
295	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,2; Anzahl der Segmente: 3
304	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 8
308	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
324	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,02; Anzahl der Segmente: 2
327	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,022; Anzahl der Segmente: 14
328	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2

	ecke	
329	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,02; Anzahl der Segmente: 11
330	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
331	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,02; Anzahl der Segmente: 2
333	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,02; Anzahl der Segmente: 11
334	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,1; Anzahl der Segmente: 2
335	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,02; Anzahl der Segmente: 11
336	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,02; Anzahl der Segmente: 2
337	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,02; Anzahl der Segmente: 2
338	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,02; Anzahl der Segmente: 11
339	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,022; Anzahl der Segmente: 14
340	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,022; Anzahl der Segmente: 2
341	Staustrecke	Segmentlänge [m]: 0,5; Fördergeschw. [m/sec]: 0,022; Anzahl der Segmente: 2
40	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
41	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
42	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
54	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
55	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
56	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
69	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
71	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
97	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
103	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
199	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
226	Einschlusser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
230	Einschl	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1

	euser	
234	Einschl euser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
249	Einschl euser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
253	Einschl euser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
255	Einschl euser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
259	Einschl euser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
263	Einschl euser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
302	Einschl euser	Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
310	Einschl euser	Durchförderweg [m]: 0,5; Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
315	Einschl euser	Durchförderweg [m]: 0,5; Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
318	Einschl euser	Durchförderweg [m]: 0,5; Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Einschlgeschw. [m/sec]: 0,1
37	Aussch leuser	Die Verteilstrategie ist zielgerichtet nach Objekttyp; nach Baustein SST_88: 112,117; nach Baustein SST_45: 24,20,28,31,26,21,22,23,29,27,30,25,18,19,17,12,124,120,128,131,126,121,122,123, 129,127,130,125,118,119
43	Aussch leuser	Die Verteilstrategie ist zielgerichtet nach Objekttyp; nach Baustein SST_90: 125,118,119, ; nach Baustein SST_62: 24,20,28,31,26,21,22,23,29,27,30,25,18,19,17,12,124,120,128,131,126,121,122,123, 129,127,130,125,118,119,117,112
52	Aussch leuser	Die Verteilstrategie ist zielgerichtet nach Objekttyp; nach Baustein SST_89:121,122,123,129,127,130,; nach Baustein SST_59: 24,20,28,31,26,21,22,23,29,27,30,25,18,19,17,12,124,120,128,131,126,127,130,118, 119,117,112,125
57	Aussch leuser	Die Verteilstrategie ist zielgerichtet nach Objekttyp; nach Baustein SST_91: 131,126; nach Baustein SST_77: 24,20,28,31,26,21,22,23,29,27,30,25,18,19,17,12,124,128,120,121,122,123,129,127, 130,125,118,119,117,112
101	Aussch leuser	Die Verteilstrategie ist zielgerichtet nach Objekttyp; nach Baustein SST_99: 120,124,128,; nach Baustein SST_75: 24,20,28,31,26,21,22,23,29,27,30,25,18,19,17,12,131,126,121,122,123,129,125,118, 119,117,112,
225	Aussch leuser	Die Verteilstrategie ist zielgerichtet nach Objekttyp; nach Baustein SST_223: 132,133,134,101,102,103,104; nach Baustein SST_202: 32,33,34,1,2,3,4,13,14,16,8,113,114,116,108
228	Aussch leuser	Die Verteilstrategie ist zielgerichtet nach Objekttyp; nach Baustein SST_271: 32,33,34,1,2,3,4,13,14,16,8,132,133,134,101,102,103,104,116,108; nach Baustein SST_294: 113,114
232	Aussch leuser	Die Verteilstrategie ist zielgerichtet nach Objekttyp; nach Baustein SST_269: 32,33,34,1,2,3,4,13,14,16,8,132,133,134,101,102,103,104,113,114; nach Baustein SST_295: 116,108
251	Aussch leuser	Die Verteilstrategie ist zielgerichtet nach Objekttyp; nach Baustein SST_278: 10,11,9,15,110,111,109,115,5,6,7; nach Baustein SST_287: 105,106,107
257	Aussch leuser	Die Verteilstrategie ist zielgerichtet nach Objekttyp; nach Baustein SST_278: 5,6,7,10,11,9,15,105,106,107,115; nach Baustein SST_287: 109,110,111
276	Aussch	Die Verteilstrategie ist zielgerichtet nach Objekttyp; nach Baustein SST_176:

	leuser	5,6,7,10,11,9,15,105,106,107,110,111,109; nach Baustein SST_287: 115
307	Ausschleuser	Durchförderweg [m]: 0,5; Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Ausschleusgeschw. [m/sec]: 0,1; Die Verteilstrategie ist Priorität der Ausgänge: SST_80: 1, DRT_309: 2
313	Ausschleuser	Durchförderweg [m]: 0,5; Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Ausschleusgeschw. [m/sec]: 0,1; Die Verteilstrategie ist Priorität der Ausgänge: SST_207: 1, DRT_314: 2
316	Ausschleuser	Durchförderweg [m]: 0,5; Durchförderge. [m/sec]: 0,1; Ausschleusgeschw. [m/sec]: 0,1; Die Verteilstrategie ist Priorität der Ausgänge: DRT_317: 2, SST_145: 1
79	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 0,1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
84	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 0,1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
86	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 0,1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
144	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 0,1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
206	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
211	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 0,1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
236	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 0,1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
241	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 0,1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
265	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 0,1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
309	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 0,1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
314	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 0,1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
317	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 0,1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
322	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
325	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
332	Drehtisch	Geschwindigkeit [m/sec]: 1; Drehzeiten [sec] E1->A1: 5
82	Arbeitsstation	Geschwindigkeit [m/sec]: 1; Arbeitszeitverteilung: Objekttyp/Taktzeit [sec]: 24/18,18,20/18,18,28/18,18,31/18,18,26/18,18,21/18,18,22/18,18,23/18,18,29/18,18,27/18,18,30/18,18,25/18,18,19/18,18,18/18,18,17/18,18,12/18,18,; Eingangsjekt/neues Objekt/Wahrscheinlichkeit: 24/124/1,20/120/1,28/128/1,31/131/1,26/126/1,21/121/1,22/122/1,23/123/1,29/129/1,27/127/1,30/130/1,25/125/1,19/119/1,18/118/1,17/117/1,12/112/1
209	Arbeitsstation	Geschwindigkeit: [m/sec]: 1; Arbeitszeitverteilung: Objekttyp/Taktzeit [sec]: 1/20,2/20,3/20,4/20,32/20,33/20,34/20,13/20,14/20,16/20,8/20; Eingangsjekt/neues Objekt/Wahrscheinlichkeit: 1/101/1,2/102/1,3/103/1,4/104/1,32/132/1,33/133/1,34/134/1,13/113/1,14/114/1,16/116/1,8/108/1
240	Arbeitsstation	Geschwindigkeit [m/sec]: 1; Arbeitszeitverteilung: Objekttyp/Taktzeit [sec]: 5/20,6/20,7/20,10/20,11/20,9/20,15/20; Eingangsjekt/neues Objekt/Wahrscheinlichkeit: 5/105/1,6/106/1,7/107/1,10/110/1,11/111/1,9/109/1,15/115/1

Das Modell selbst kann wegen seiner Größe weder im Hauptteil noch im Anhang abgebildet werden. Die Modelle zu allen Experimenten befinden sich auf der CD im Anhang jeweils in Form einer mfs-Datei.

Aufgrund der vorprogrammierten Bausteine der Dosimis-3-Anwendung stößt das hier erstellte Modell an Grenzen. Die Lötbäder wurden jeweils durch eine Kombination aus einer Arbeitsstation und einer Staustrecke dargestellt. Um den Mindestabstand der Lötrahmen von 0,4m zu gewährleisten, sorgt die Arbeitsstation dafür, dass frühestens alle 20s (Welle 1,3) bzw. 18,18s (Welle 2) ein Lötrahmen auf die Förderstrecke gelangt. Die Taktzeiten der Arbeitsstationen sind also für alle Objekte auf 20s bzw. 18,18s eingestellt. Während dieser Zeit wird bei einer Geschwindigkeit von 0,02m/s bzw. 0,022m/s ein Weg von 0,4m zurückgelegt, also genau der Mindestabstand der Lötrahmen voneinander. Die Staustrecke im Anschluss transportiert die Rahmen über eine Strecke von 5,5m bzw. 7m. Bei der Modellierung wurde explizit auf die Verweilzeit der Objekte in den beiden Bausteinen geachtet. Die Objekte verweilen in der Arbeitsstation und auf der Staustrecke auf Strang 1 und 3 $20s + (5,5/0,02)s = 295s$ und auf Strang 2 $18,18s + (7/0,022)s = 336,36s$. Bezogen auf die jeweiligen Lötgeschwindigkeiten entsprechen diese Werte einer Lötovenlänge von 5,9m bzw. 7,4m. An dieser Stelle entspricht das Modell also nicht exakt dem realen System. Der zeitliche Fehler, der hier pro Objekt entsteht, ist $295s - 285s = 10s$ bzw. $338,18s - 327,27s = 10,91s$. Dies verzerrt die Durchlaufzeiten der Lötrahmen. Außerdem hat die Parametrisierung der Staustrecke zur Folge, dass ihre Belegungen nicht den Belegungen der realen Lötanlagen entsprechen, denn die Staustrecken wurden mit einer theoretischen Kapazität von 11 bzw. 14 Lötrahmen parametrisiert. Zusammen mit der Segmentlänge von 0,5m entspricht das einer Streckenlänge von 5,5 bzw. 7m. Die Differenz zur Realität ist hier der Tatsache geschuldet, dass die Segmentanzahl nur ganzzahlige Werte annehmen kann. Im realen System müssen die Rahmen, wie schon erwähnt, jedoch einen Abstand von mindestens 0,4m haben, weshalb die Belegungen der einzelnen Anlagen keine auf die Realität übertragbaren Werte liefern. Im Zuge der Auswertung von Glättungen können aber die Belegungen der einzelnen Staustrecken zueinander ins Verhältnis gesetzt oder miteinander verglichen werden, denn der Fehler ist bei allen drei Anlagen annähernd der gleiche, so dass die Verhältnisse untereinander in etwa der Realität entsprechen. Das Verhältnis von realer Kapazität zur Kapazität im Modell beträgt $6,33/11 = 0,575$ bzw. $8/14 = 0,571$. Es wird also bei der Ergebnisauswertung u.a. davon ausgegangen, dass gilt:

$$\frac{\text{Belegung}_{\text{Stau}}(\text{Welle 1})}{\text{Belegung}_{\text{Stau}}(\text{Welle 2})} / \frac{\text{Belegung}_{\text{Stau}}(\text{Welle 3})}{\text{Belegung}_{\text{Löt}}(\text{Welle 1})} / \frac{\text{Belegung}_{\text{Löt}}(\text{Welle 2})}{\text{Belegung}_{\text{Löt}}(\text{Welle 3})} =$$

Die Sondersenkstationen wurden im Dosimis-3-Modell jeweils durch eine Kombination von Ausschleuser, Drehtisch und Einschleuser abgebildet. Die Ausschleuser werden mit

der Strategie *Priorität der Ausgänge* belegt, damit sie, falls ein Stau entsteht, Objekte ausschleusen und somit in einer Schleife zirkulieren lassen. Dies schützt in der Realität die Antriebsketten, die bei Staubildung an einigen Stellen konstant belastet würden. Es ist nicht nötig, bereits bearbeitete Objekte vor einem nochmaligen Eintritt in das System Lötanlage zu schützen, denn dieser Fall kann während der Experimente in dem Modell nicht auftreten, denn alle bearbeiteten Objekte werden an den Ausschleusern auf die Ausschleusbänder gefahren und stauen sich davor, falls die Bänder vollständig belegt sind. Für die Betrachtungen in den nachfolgenden Experimenten ist diese Modellierung ausreichend, denn es soll im letzten Experiment lediglich eine Aussage darüber getroffen werden, ob das Aktive Buffering aufgrund von nicht rechtzeitig abgenommenen Lötrahmen und somit vollständig belegten Ausschleusbändern, notwendig ist. Dies ist dann der Fall, wenn es vor mindestens einem Ausschleuser zum Stau kommt, denn dann würde es zum Aktiven Buffering kommen. Alle Eckumsetzer werden als Drehtische mit einer Drehzeit von 5s modelliert, was der Realität zeitlich ungefähr entspricht.

Zur V&V des ausführbaren Modells wurden mehrere Techniken angewendet. Zunächst wurde ein Schreibtischtest durchgeführt, bei dem vor allem die einzelnen Bausteine, ihr Zusammenspiel und die fixen Parametrisierungen im Fokus standen. Die Parameter, die für die einzelnen Experimente variiert werden müssen, wurden beispielhaft belegt. Danach wurde die Dosimis-3-Funktion *Animation* genutzt, um verschiedene Szenarien durchzuspielen und hinsichtlich der Korrektheit der Abläufe zu prüfen. Es konnte dabei keine Unregelmäßigkeit festgestellt werden. Abbildung 6-2 zeigt einen Teil des ausführenden Modells während der Animation:

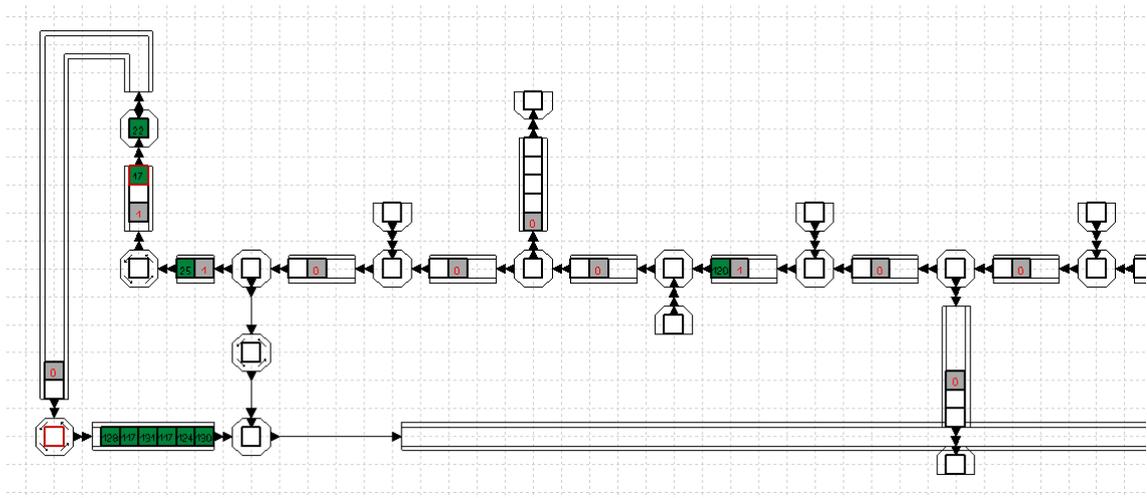


Abbildung 6-2: Auszug aus einer Animation eines Simulationsexperiments

Es wurde darauf geachtet, dass alle Verteillogiken mindestens einmal durchlaufen wurden und alle Bausteine die erwarteten Zustände mindestens einmal annehmen. Dabei reagiert das System erwartungsgemäß auf Parameteränderungen. Das ausführbare Modell wurde außerdem erfolgreich gegen die Aufgabenspezifikation und die Zielbeschreibung der Studie validiert.

6.7 Experimente und Ergebnisse

6.7.1 Auslastungsglättung

Zur Produktionsnivellierung gehört einerseits die Glättung von Produktionsaufträgen über bestimmte Perioden und andererseits eine gleichmäßige Auslastung aller Betriebsmittel. Diese Auslastungsglättung ist das Ziel des ersten Versuchs am Simulationsmodell.

Im Vorfeld zu diesem Experiment muss zunächst eine Verteilung der Baugruppen auf die 3 Wellen als Ausgangssituation stattfinden. Diese Aufteilung wird im Modell dann implementiert, simuliert und hinsichtlich der Auslastung ausgewertet. Sollten die Auslastungen der drei Wellen nicht gleichmäßig sein, so werden Baugruppen auf den Strängen nach logischen Kriterien getauscht und der Versuch erneut ausgewertet. Dies soll iterativ so lange geschehen, bis eine zufriedenstellende Gleichverteilung erreicht ist. Die ist erreicht, wenn die Kennzahl der durchschnittlichen prozentualen Auslastung und zusätzlich die Belegung über der Zeit der drei Anlagen jeweils annähernd gleich sind.

Die Aufteilung der Baugruppen auf die Stränge illustriert die nachfolgende Tabelle:

Tabelle 6-8: Die Aufteilung der Baugruppen auf die drei Lötanlagen

Aufteilung der Baugruppen					
Welle 1		Welle 2		Welle 3	
Baugruppen	Anzahl Lötrahmen	Baugruppen	Anzahl Lötrahmen	Baugruppen	Anzahl Lötrahmen
32-34	200	24	52	5+6	100
1+2+3+4	34	20+28	50	7	112
13+14	89	21-23, 29	50	10+11	100
16	90	27+30	42	9	67
8	54	17	169	15	82
		12	34		
		31	34		
		26	31		
		25	27		
		18+19	9		

Summe:	467	498	461
---------------	------------	------------	------------

Die Aufteilung wurde so durchgeführt, dass die Summe der Lötrahmen auf Strang 1 in etwa der auf Strang 3 entspricht und beide in etwa 92,3% der Summe der Lötrahmen auf Strang 2 entsprechen. 92,3% entspricht ca. dem Verhältnis von Lötgeschwindigkeit der Wellen 1 und 3 zur Lötgeschwindigkeit der Welle 2 $[(1,2\text{m/min})/(1,3\text{m/min})]$. Die vollständige Parametrisierung ist dem vorherigen Abschnitt zu entnehmen.

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Belegungen der drei Staustrecken als Funktion der Zeit:

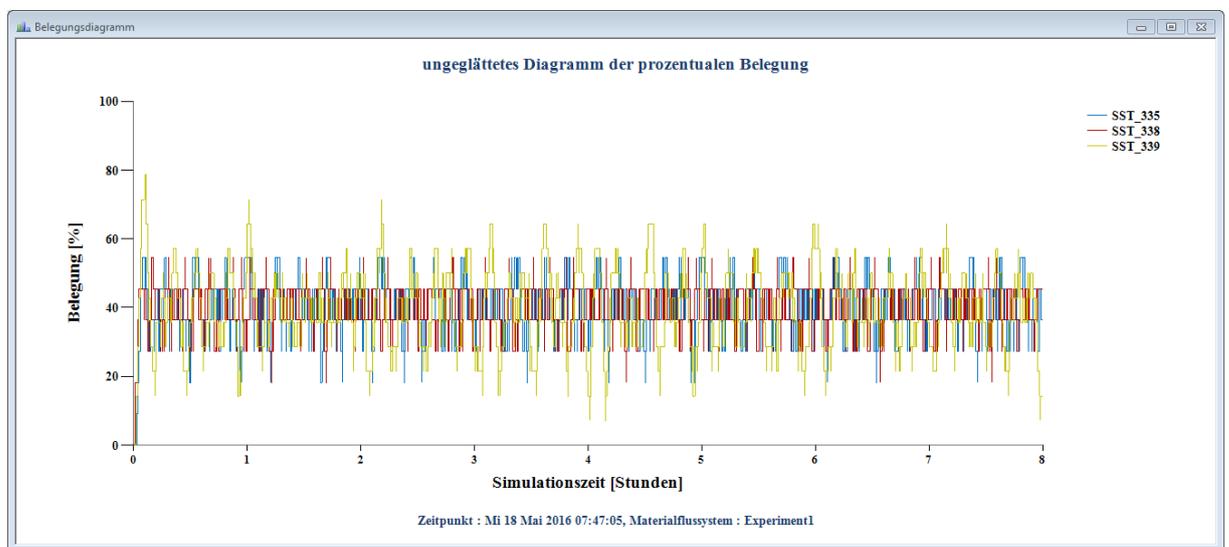


Abbildung 6-3: Ungeglättetes Diagramm der prozentualen Belegungen der Staustrecken 335,338,339

Man erkennt, dass sich die Belegung aller drei Anlagen die meiste Zeit zwischen 35-45% bewegt. Um final zu beurteilen, wie gleichmäßig die drei Anlagen arbeiten, sollen noch zusätzlich die Durchsätze und die durchschnittliche prozentuale Auslastung der Staustrecken nach 480min hinzugenommen werden. Die Durchsätze wurden in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 6-9: Die Durchsätze der Lötanlagen

Lötanlage	Zu bearbeitende Lötrahmen pro Schicht	Durchsatz nach 480min	Bearbeitete Rahmen in %
1	467	463	99,14

2	498	496	99,6
3	461	456	98,92

Die zweite Spalte zeigt die Anzahl an Lötrahmen, die pro Schicht bearbeitet werden sollen, in der dritten Spalte wird der tatsächliche Durchsatz der Staustrecken angezeigt. Die vierte Spalte veranschaulicht, welcher Anteil der Soll-Stückzahl durchgesetzt wurde. Man erkennt, dass annähernd jedes Objekt nach 480min durch das System Lötanlage gefahren ist. Lediglich 6+3+5 Objekte fehlen zur Soll-Stückzahl. Es ist folglich anzunehmen, dass sich diese Objekte nach Ablauf der Simulationszeit noch auf dem Transportband oder im System aus Arbeitsstation und Staustrecke befinden und kurze Zeit später ebenfalls das System verließen. Die prozentuale Auslastung der Bausteine ist in der nächsten Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 6-10: Die Auslastungen der Staustrecken 335,338,339

Lötanlage	Baustein	Auslastung [%]
Strang 1	SST_335	40,34
Strang 2	SST_339	39,33
Strang 3	SST_338	39,93

Auch die prozentuale Auslastung der drei relevanten Staustrecken weist, wie erwartet, ein sehr ausgeglichenes Ergebnis auf. Insgesamt deuten die Belegungsdiagramme in Verbindung mit den Durchsätzen und den prozentualen Auslastungen der relevanten Bausteine auf eine geglättete Auslastung im Sinne der Zielbeschreibung hin. Es muss also keine Korrektur der Baugruppenaufteilung vorgenommen werden. Die hier als adäquat erachtete Aufteilung wird als Grundlage für die weiteren Experimente genommen.

Die Verifikation und Validierung soll, wie bereits beschrieben, umfassend durchgeführt werden. Daher ist es unabdingbar, die einzelnen Schritte der V&V durch verschiedene Techniken abzubilden. Häufig finden die beiden Techniken „Validierung im Dialog“ und der „Schreibtischtest“ Anwendung. Einige Simulationsergebnisse werden zusätzlich mit Hilfe der in Dosimis-3 angebotenen Animation verifiziert.

6.7.2 Stückzahlerhöhung

Die folgenden Versuche am Modell sollen Aufschluss darüber geben, inwieweit Stückzahlen erhöht werden können, ohne das System zu überfordern. Weil es bei dem

Pumpenhersteller in den letzten Jahren regelmäßig zu Bedarfserhöhungen gekommen ist, werden drei Stufen der Stückzahlerhöhung simuliert: 15%, 25% und 50%. Tabelle XY zeigt die sich daraus ergebenden Taktzeiten der Quellen:

Tabelle 6-11: Die Taktzeiten der Quellen bei Stückzahlerhöhungen um 15%, 25% und 50%

Baugruppen	Taktzeit [s] bei		
	115%	125%	150%
32-34	125	115	96
1-4	737	678	565
13+14	282	259	216
16	278	256	213
8	465	426	355
24	481	443	369
31	737	678	565
20+28	501	461	384
21-23, 29	501	461	384
26	808	743	619
25	928	854	711
27+30	597	549	457
17	148	136	113
18+19	2783	2560	2133
12	737	678	565
5+6	250	230	192
7	223	206	171
10+11	250	230	192
9	374	344	287
15	305	281	234

Bei 115% der Stückzahlen aus Experiment 1 zeigen die relevanten Staustrecken belegungstechnisch eine ähnlich gleichmäßige Auslastung:

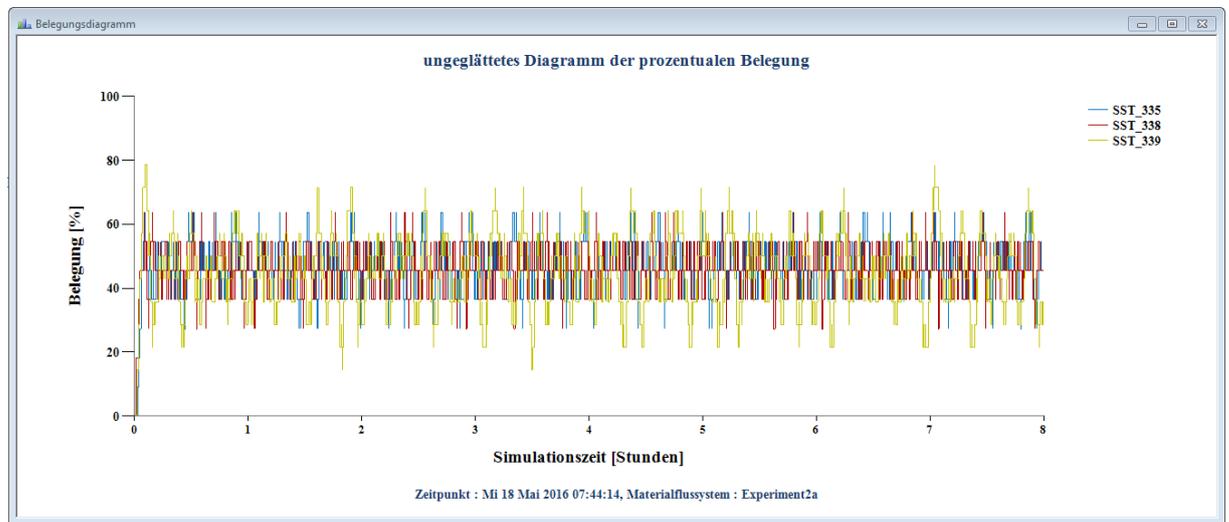


Abbildung 6-4: Ungeglättetes Diagramm der prozentualen Belegungen der Staustrecken 335,338,339 bei einer Stückzahlerhöhung um 15%

Man erkennt, dass die Belegung der drei Staustrecken die meiste Zeit prozentual zwischen 35 und 55% liegt. Es sind vereinzelte Peaks von ca. 70% zu sehen. Die Belegungsminima liegen, beachtet man die Anlaufzeit der Anlagen nicht, bei ca. 20%. Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Beurteilung, ob das System fähig ist, diese Stückzahlerhöhung abzubilden, ist die Eingriffshäufigkeit der Sondersenkstation. Um darüber eine Aussage treffen zu können, wurden die Durchsätze der Drehtische 314, 309 und 317 ausgewertet. Keiner der Drehtische setzt ein Objekt durch. Das bedeutet, vor keiner der modellierten Lötanlage entsteht während der 8h Stau. Damit konnte gezeigt werden, dass das System die erste Stufe der Stückzahlerhöhung ohne Probleme abbilden kann.

Die Stückzahlerhöhung um 25% zeigt eine Belegung der Staustrecken über der Zeit, die sich meist zwischen 35 und 65% bewegt. Es sind Peaks von knapp 80% und Minima von ca. 20% zu erkennen.

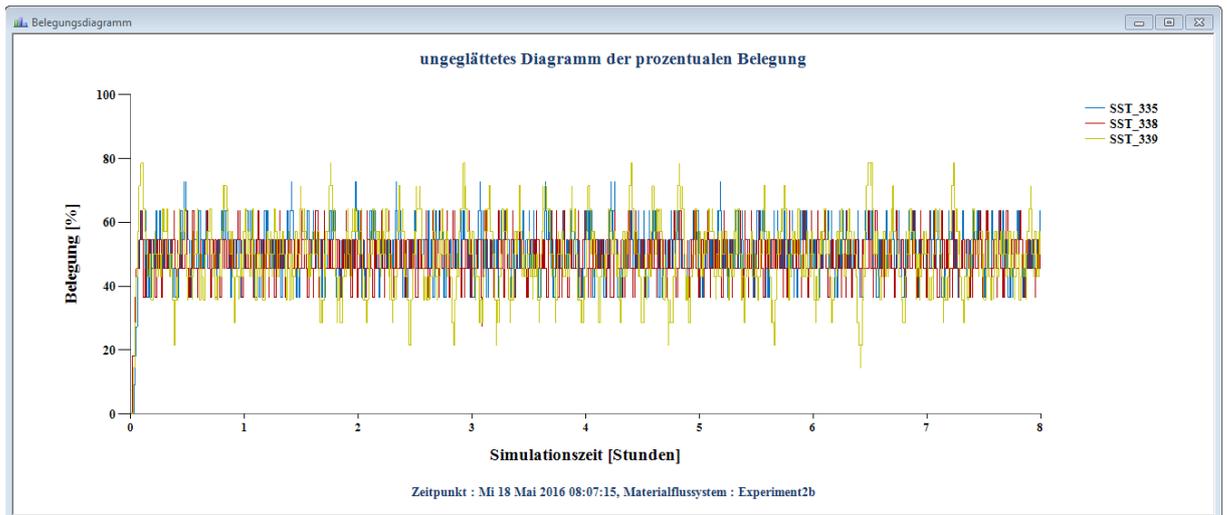


Abbildung 6-5: Ungeglättetes Diagramm der prozentualen Belegungen der Staustrecken 335,338,339 bei einer Stückzahlerhöhung um 25%

Die durchschnittliche Auslastung der Bausteine befindet sich bei 50,16% (SST_335), 49,28% (SST_339) und 48,63% (SST_338). Auch hier versetzen die modellierten Sondersenkstationen keine Objekte ins Aktive Buffering. Das bedeutet, dass auch hier keinerlei Staubildung stattfindet und das System auch diese Erhöhung der Stückzahlen abbilden kann.

Die dritte Stufe, eine Erhöhung um 50% der Ausgangsstückzahl, führt zu der folgenden Belegung der Staustrecken über der Zeit:

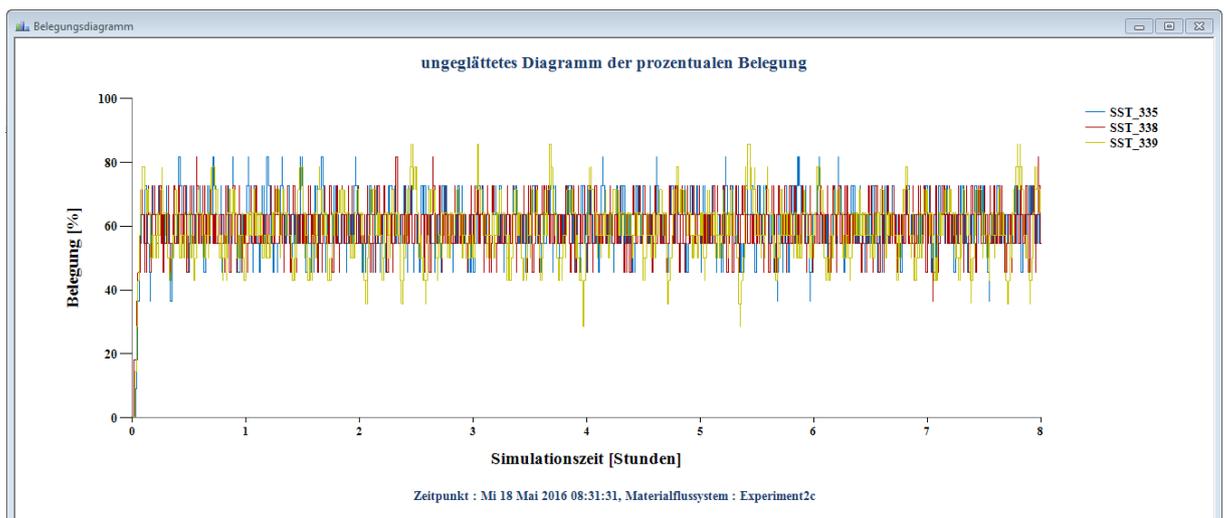


Abbildung 6-6: Ungeglättetes Diagramm der prozentualen Belegungen der Staustrecken 335,338,339 bei einer Stückzahlerhöhung um 50%

Man erkennt, dass sich die prozentuale Belegung der Staustrecken die meiste Zeit zwischen 50 und 70% bewegt. Modellbedingt werden die Staustrecken nie vollständig belegt sein. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass die vorgeschaltete Arbeitsstation taktgebend ist und höchstens alle 20s ein Objekt ausschleust. Die prozentuale Belegung der Staustrecken entspricht aber, wie bereits erörtert, nicht der realen Lötanlage und soll nur zum Vergleich der Bausteine untereinander herangezogen werden. Betrachtet man die Durchsätze der Drehtische 314, 309 und 317, so stellt man fest, dass DRT_314 ein Objekt befördert, die anderen beiden Bausteine keins. Hieraus kann abgeleitet werden, dass die Sondersenkstation nur ein einziges Mal während der Schicht einen Lötrahmen aktiv puffern muss und das System auch diese Stückzahlerhöhung problemlos abbilden kann.

6.7.3 Kurzfristige Umverteilung der Mitarbeiter

Weil es im Tagesgeschäft gelegentlich zu kurzfristigen Bedarfsschwankungen seitens der Kunden kommt, soll mit dem nächsten Versuch unter Worst-case-Bedingungen geprüft werden, inwieweit es möglich ist, einen Mitarbeiter in eine andere Linie zu transferieren und dort somit die Stückzahlen zu verdoppeln. Die kapazitiv ungünstigste Umsetzung ist das Transferieren eines Mitarbeiters aus der Linie 18+19 in die Linie 32-34. Das hat zur Folge, dass die Taktzeit der Linie 32-34 sich auf 72s halbiert und in Linie 18+19 keine Leiterplatte mehr bestückt wird. Das Belegungsdiagramm der relevanten Staustrecken 335, 339 und 338 zeigt eine deutliche Verschiebung:

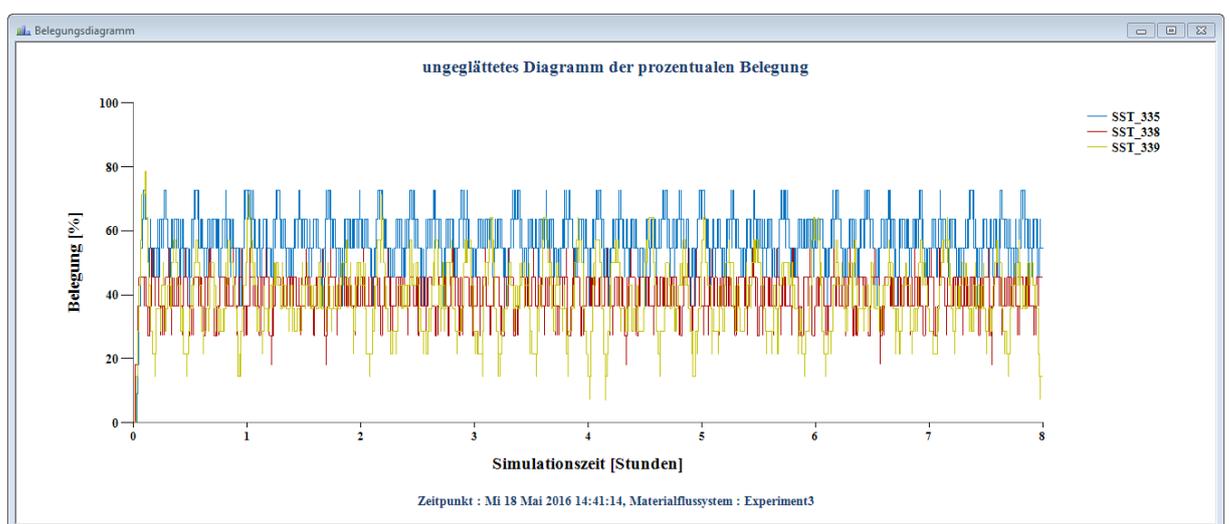


Abbildung 6-7: Ungeglättetes Diagramm der prozentualen Belegungen der Staustrecken 335,338,339 im Worst Case einer Umverteilung der Mitarbeiter

Während sich die Belegungen der Staustrecken von Welle 2 und 3 aufgetragen über der Zeit meist zwischen 35 und 45% bewegt, schwankt die Belegung von Welle 1 meist

zwischen 55 und 65%. Die durchschnittliche Auslastung liegt bei 39,33% (Welle 2), 39,93% (Welle 3) und bei 57,65% (Welle 1). Theoretisch ist bei diesem Experiment Strang 1 staugefährdet. Eine Überprüfung des Durchsatzes von Drehtisch 314 führt zu dem Ergebnis, dass die Sondersenkstation genau einmal eingreift und einen Lötrahmen aktiv puffert. Zusammengefasst kann man also davon ausgehen, dass das Produktionssystem diese Umverteilung der menschlichen Ressourcen ohne kapazitätsbedingte Störungen abbilden kann.

6.7.4 Aktives Buffering

In diesem Experiment soll die Notwendigkeit des Aktiven Bufferings aufgrund von nicht rechtzeitig vom Ausschleusband entnommener Lötrahmen erörtert werden. Nimmt ein Mitarbeiter einen Lötrahmen nicht rechtzeitig vom Band, so kann es dazu kommen, dass alle 3 Pufferplätze belegt sind und sich weitere fertige Lötrahmen auf dem Weg zum Ausschleuser befinden. In diesem Fall würden die Ausschleuser des realen Systems diese Lötrahmen ins Aktive Buffering versetzen. Technisch gesehen handelt es sich hierbei um eine weitere Automatisierungsstufe des Prozesses. Weil die Ausschleuser im Simulationsmodell nicht fähig sind, die gelöteten Rahmen im Falle eines Staus auf dem Transportband weiterzuleiten, werden zur Auswertung des Versuchs die Staustrecken nach allen Ausschleusungen und zusätzlich das gesamte Systemverhalten analysiert. Für die Simulation werden die Senken mit einer Taktzeit von 600s belegt. Das entspricht in der Realität dem Fall, dass die Mitarbeiter nur alle 10min einen Lötrahmen zum Testen entnehmen.

Viele Staustrecken nach den Ausschleusern, meist im hinteren Bereich der Wellen angesiedelt, weisen während der Simulationszeit eine konstante Belegung von 100% auf. Die Staustrecken im vorderen Bereich der Welle liegen belegungstechnisch bei ca. 80%. Diese Beobachtungen legen die Vermutung nahe, dass die hinteren Ausschleuser einen Stau verursachen, der dafür sorgt, dass das gesamte System zum Erliegen kommt bzw. die Durchlaufzeiten der Lötrahmen immens in die Höhe gehen. Diese Überlegung wird einerseits durch die Durchlaufzeitstatistik des Systems mit Daten und andererseits von der Animation graphisch untermauert. Die Abbildungen 6-8 und 6-9 zeigen die Durchlaufzeiten mit den Senkentakten 60s und 600s.

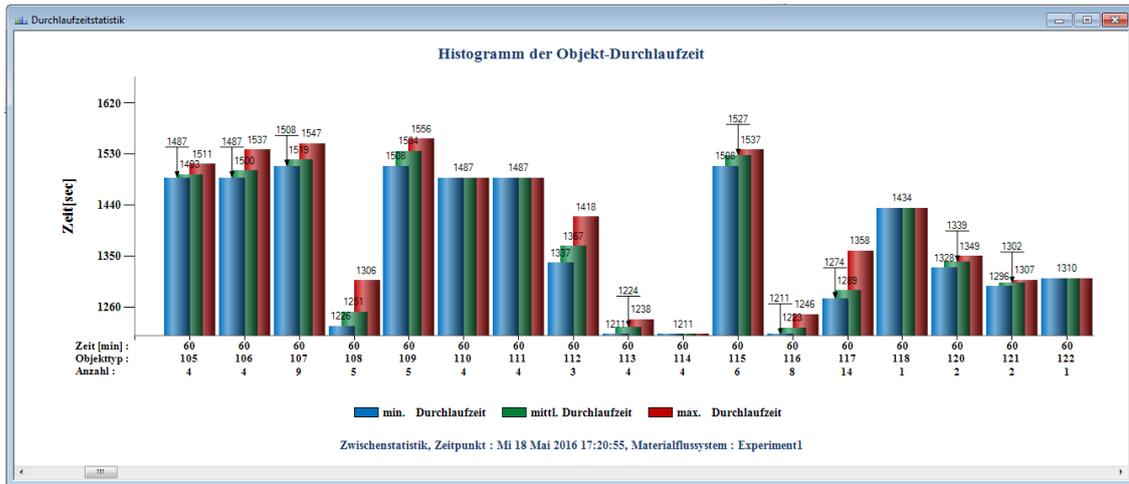


Abbildung 6-8: Durchlaufzeitenhistogramm bei einem Senkentakt von 60s

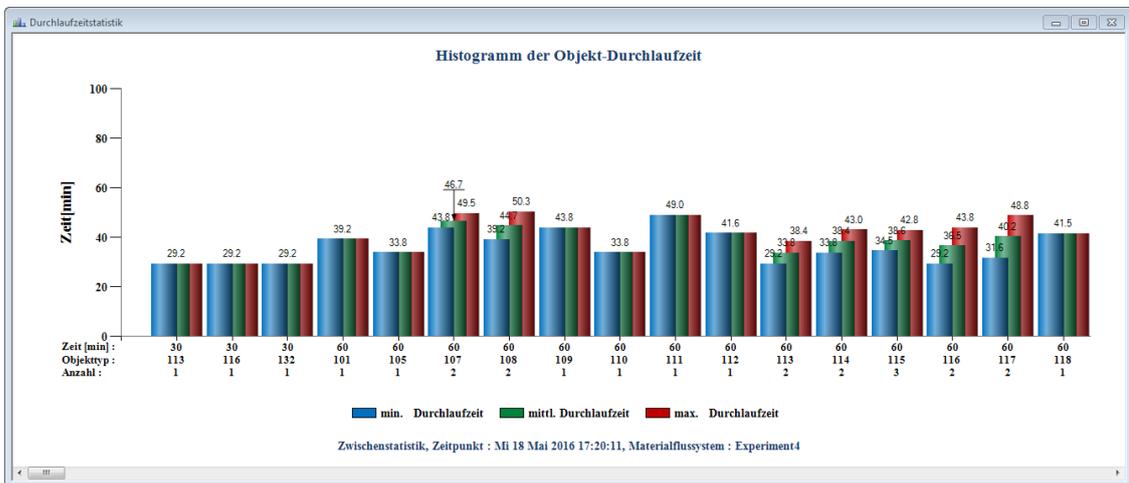


Abbildung 6-9: Durchlaufzeitenhistogramm bei einem Senkentakt von 600s

Man sieht, dass sich die Durchlaufzeiten bei einer Taktzeit von 600s deutlich erhöht haben. Die Animation macht zudem deutlich, dass das System die Stückzahlen bei einer regelmäßigen Abwesenheit der Mitarbeiter von der Linie bzw. einem groben Fehlverhalten nicht adäquat abbilden kann. Es ist folglich unabdingbar, dass das Aktive Buffering eingeführt wird.

Zur V&V der Ergebnisse wurde ebenfalls die Animationsfunktion genutzt. Dazu wurde bei jedem Experiment visuell überprüft, ob die Abläufe im Modell plausibel sind. Die gezogenen Schlüsse decken sich an vielen Stellen mit den erwarteten Ergebnissen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die ausgegebenen Daten vollständig und korrekt sind.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, einen Schlüsselprozess der Elektronikfertigung eines Pumpenherstellers im Zuge einer Werksvergrößerung bestandsreduziert und durchlaufzeitoptimiert zu planen. Im Anschluss sollte das Ergebnis mit rechnergestützter Simulation analysiert und bewertet werden.

Der Ansatz der Lean Production liefert Konzepte zur Optimierung von Produktionsprozessen hinsichtlich der Forderungen nach geringeren Beständen und kürzeren Durchlaufzeiten. Es wurden Ansätze zur Verbesserung sowohl eines ganzheitlichen Produktionssystems als auch in der Tiefe einzelner Prozesse beschrieben.

Bei der Ist-Analyse der Produktionsprozesse wurden alle Kernprozesse zur Herstellung von Elektronikmodulen für Pumpen detailliert beschrieben. Unter besonderer Berücksichtigung einer schlanken Prozessführung wurden Verbesserungspotentiale erkannt und Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt. Besonders bei der Produktionssteuerung bezüglich der Richtung, in der Informationen und Aufträge für die Produktion weitergegeben werden, und bei der Bildung von interdisziplinären Teams zur Lösungsbewältigung konnten Schwachstellen aufgezeigt werden.

Auf Prozessebene sollte das automatisierte Löten von THT-Komponenten auf Leiterplatten neu geplant werden. Dazu wurde zunächst eine ausführliche Ist-Analyse des Prozesses durchgeführt und die Arbeitsplätze des Bereiches vorgestellt. Unter Beachtung von Restriktionen seitens der Räumlichkeiten, der Technologien und des Managements wurde der Prozess mit drei Wellenlötanlagen neu ausgelegt und ein Fertigungslayout in Microsoft Visio erstellt. In dem Layout wurde die Produktionshalle, die für das Löten zur Verfügung steht, mit einem vorgegebenen Supermarkt, den Lötanlagen und den Wegen konstruiert. Die Transportbänder der Lötanlagen mussten abgelenkt werden, damit die Räumlichkeiten optimal genutzt werden können.

Die Ereignisdiskrete Simulation liefert als Werkzeug der Prozessanalyse die Möglichkeit der Bewertung eines geplanten Prozesses. Es wurden verschiedene Simulationsvorgehensmodelle erörtert und das Modell nach ASIM mit einem Vorgehensmodell zur Verifikation und Validierung entlang der gesamten Simulationsstudie zusammengebracht, um als strukturelle Grundlage der Simulation des Prozesses zu fungieren. Das bei der Prozessplanung entstandene Layout samt einer statischen Berechnung einer Auslastungsglättung der drei Lötanlagen diente als Vorbild für das Simulationsmodell, an dem dann verschiedene Experimente durchgeführt und Rückschlüsse auf die Realität gezogen wurden. Es wurde die zuvor statisch berechnete Auslastungsglättung unter dynamischen Bedingungen geprüft und die Möglichkeiten von Stückzahlerhöhungen bewertet.

Die Prozessplanung wurde erfolgreich durchgeführt und methodisch gezielt überprüft. Die vorgenommene Auslastungsglättung nach Prinzipien der Lean Production hat im ersten Anlauf mit Hilfe einer statischen Berechnung ein zufriedenstellendes Ergebnis geliefert. Die Simulation hat gezeigt, dass Stückzahlerhöhungen von bis zu 50% problemlos vom geplanten System abgebildet werden können. Auch kurzfristige Umverteilungen der Mitarbeiter bringen keinerlei kapazitätsbedingte Störungen mit sich. Eine erweiterte Automatisierung in Form eines Aktiven Bufferings macht Sinn, um Fehlverhalten der Mitarbeiter adäquat auffangen zu können. Es wird daher die Empfehlung gegeben, die Transportelemente entsprechend zu programmieren. Mit der Generierung der Ergebnisse in dieser Arbeit haben sich neue Aufgabenpakete entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass der Prozess den kurz- sowie den mittelfristigen Produktionsplanungshorizont in jedem Fall kapazitiv abbilden kann. Mit der Auslegung des automatisierten Lötens können vor- und nachgelagerte Prozesse hinsichtlich ihrer Materialflüsse und Fertigungslayouts geplant werden. Zudem liefert das MS-Visio-Layout eine Vorarbeit für ein Feinlayout. In diesem kann mittels CAD-Software die Fertigungshalle detailliert ausgelegt werden. Außerdem kann das Simulationsmodell um die angrenzenden Fertigungs- und Logistikprozesse erweitert werden. Im Anschluss daran kann eine umfangreichere Studie Aufschluss über die Verknüpfung der jeweiligen Prozesse geben. Die Vorgehensweise zur Durchführung einer Simulationsstudie und zur Verifikation und Validierung können dabei adaptiert werden.

8 Literaturverzeichnis

BRUNNER, F. (2014): Japanische Erfolgskonzepte, KAIZEN, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance Shopfloor Management, Toyota Production System, GD³ - Lean Development, Wien/Ulm: Hanser Verlag

DICKMANN, P. (2014): Schlanker Materialfluss, mit Lean Production, Kanban und Innovationen, Grafing b. München: Springer Verlag

BECKER, H. (2006): Phänomen Toyota, Erfolgsfaktor Ethik, Berlin Heidelberg: Springer Verlag

LIKER, J. (2004): Der Toyota Weg: Erfolgsfaktor Qualitätsmanagement, München: FinanzBuch Verlag

OHNO, T. (2009): Das Toyota-Produktionssystem, Das Standardwerk zur Lean Production, Frankfurt am Main: Campus Verlag

BECKER, T. (2005): Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren, Berlin Heidelberg: Springer Verlag

VDI (2008): VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 „Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen“. Beuth, Berlin

RABE, M.; SPIEKERMANN, S.; WENZEL, S (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Vorgehensmodelle und Techniken, Berlin Heidelberg: Springer Verlag

KUHN, A.; RABE M. (1998): Simulation in Produktion und Logistik, Berlin Heidelberg: Springer Verlag

MÄRZ, L.; KRUG, W.; ROSE, O.; WEIGERT, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik, Berlin Heidelberg: Springer Verlag

Anhang

Anhang A: Das Layout der Anlagen

Eidesstattliche Versicherung

Name, Vorname

Matr.-Nr.

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit/Masterarbeit* mit dem Titel

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

*Nichtzutreffendes bitte streichen

Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG -)

Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Die Technische Universität Dortmund wird gfls. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen.

Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Ort, Datum

Unterschrift