

**Konzept zur Integration von Simulation in Six Sigma am Beispiel
der Ultraschallverschweißung**

Bachelorarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades des
Bachelor of Science Maschinenbau

Vorgelegt am Fachgebiet IT in Produktion und Logistik der
Universität TU Dortmund und
bei der Leopold Kostal GmbH & Co. KG
bei Professor Dr.-Ing. Markus Rabe (1. Prüfer),
Dipl.-Geoinf. Maik Deininger (2. Prüfer) und
Dipl.-Ing. Dirk Lindemann (Betreuer)

Von: Yavuz Yasar

Matr.-Nr.: 148704

Dortmund, 15.12.2016

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Markus Rabe und Herrn Dipl.-Geoinf. Maik Deininger, die mir die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit gegeben haben und mich tatkräftig durch ihr Vertrauen und Fachwissen unterstützt haben. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dirk Lindemann bedanken, der mich während meiner Tätigkeit bei der Leopold Kostal GmbH & Co. KG unterstützt hat.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Eltern Behice und Kemal Yasar bedanken, die mir durch ihre Unterstützung mein Studium ermöglicht haben. Des Weiteren möchte ich diese Arbeit meinen verstorbenen Großeltern Bahcegül und Demir Yasar widmen, die sich über meinen Abschluss sehr gefreut hätten.

Ganz besonders möchte ich mich bei Yasemin und Muhammed Yigit; Gülsemin, Kadir und Kerim Efe Madenoglu und letztlich bei Beyza Yasar bedanken, die mich mit viel Geduld moralisch unterstützt haben.

Zum Schluss möchte ich meiner Lebensgefährtin Seda Saltürk danken, die seit Beginn meines Studiums an meiner Seite stand und durch ihre Anregungen mir jederzeit geholfen hat.

Nachrodt, im Dezember 2016

Yavuz Yasar

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	ii
Tabellenverzeichnis.....	iii
Abkürzungen.....	iii
1. Einleitung.....	1
2. Stand der Wissenschaft.....	4
2.1. Die Vormontageanlage und der Ultraschallschweißprozess.....	4
2.2. Six Sigma: Das statistische Qualitätswerkzeug.....	7
2.2.1. Define: Projektdefinition und -verständnis.....	9
2.2.2. Measure: Prozessverhalten aufzeichnen.....	12
2.2.3. Analyze: Analysieren des vorliegenden Problems.....	15
2.2.4. Improve: Lösungen finden und umsetzen.....	16
2.2.5. Control: Kontrolle des Prozesses.....	17
2.3. Simulation: Die numerische Untersuchung.....	19
2.3.1. Systeme, Modelle und deren verschiedene Simulationsarten.....	20
2.3.2. Kontinuierliche Simulation.....	24
2.3.3. Ereignisdiskrete Simulation.....	25
2.3.4. Monte-Carlo-Simulation.....	28
2.4. Vorhandene Verknüpfungsansätze.....	31
3. Die Auswahl der geeigneten Simulationsvariante.....	39
3.1. Kontinuierliche Simulation.....	39
3.2. Ereignisdiskrete Simulation.....	40
3.3. Monte-Carlo-Simulation.....	42
4. Die Integration von Simulation in Six Sigma.....	44
4.1. Define Phase.....	44
4.2. Measure Phase.....	48
4.3. Analyze Phase.....	53
4.4. Improve Phase.....	58
4.5. Control Phase.....	64
5. Zusammenfassung.....	66
6. Literaturverzeichnis.....	68
Eidesstattliche Versicherung.....	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Verfahrensablauf beim Ultraschallschweißen	5
Abbildung 2.2: Prinzip des Ultraschallschweißens nach [KLN16]	6
Abbildung 2.3: Gegenüberstellung von LSS, DMAIC und DFSS [EA06]	9
Abbildung 2.4: Critical to Quality Baum einer Kundenhotline aus [TK09]	11
Abbildung 2.5: Formel zum Einschätzen der Stichprobengröße aus [TK09]	12
Abbildung 2.6: Aufbauschema einer Kontrollkarte [SSM]	14
Abbildung 2.7: Ishikawa-Diagramm [SHBMMR13]	16
Abbildung 2.8: Kontrollkarte mit 2 Phasen [SSM]	17
Abbildung 2.9: Vergleich der Prozessstreuung zwischen dem alten und neuen Stand eines fiktiven Prozesses [TK09]	18
Abbildung 2.10: Der Zusammenhang von einem System und einem Prozess [EST]	21
Abbildung 2.11: Darstellung eines Systems als Simulation nach [LAW15]	22
Abbildung 2.12: Die Ebenen der Simulation aus [EA06]	22
Abbildung 2.13: Prozessverhalten eines kontinuierlichen Modells [EST]	23
Abbildung 2.14: Prozessverhalten eines zeitdiskretes Modells [EST]	23
Abbildung 2.15: Prozessverhalten eines ereignisdiskretes Modells [EST]	24
Abbildung 2.16: Feder-Masse-Dämpfer-System mit Differentialgleichung und Randbedingung [EST]	25
Abbildung 2.17: Modellierung der Zeit mit Sprung zum nächsten Ereignis [EST]	26
Abbildung 2.18: Modellierung der Zeit mit konstanten Zeitschritten Δt [EST]	27
Abbildung 2.19: Eingrenzen der Input-Variablen aus [Schlundt13]	29
Abbildung 2.20: Generierung von Zufallszahlen aus [Schlundt13]	29
Abbildung 2.21: Annäherung an die Kreiszahl aus [Schlundt13]	30
Abbildung 2.22: Integration von Simulation in Lean Six-Sigma [UMNO15]	33
Abbildung 2.23: Ansatzpunkte für die gegenseitige Unterstützung von Lean und Simulation [UMNO15]	34
Abbildung 2.24: Integration von Simulation in den DMAIC-Zyklus [EA06]	35
Abbildung 2.25: Fahrplan nach der Zusammenführung von Simulation und LSS [EA06]	38
Abbildung 4.1: Critical to Quality-Baum des Ultraschallschweißprozesses	45
Abbildung 4.2: Auszug aus der Statistik Software JMP, zur Messsystemanalyse des Peeltests	50
Abbildung 4.3: Einzelwertkarte des Ultraschallschweißprozesses	52
Abbildung 4.4: ANOVA der Faktoren LED und NEST	54
Abbildung 4.5: Ishikawa-Diagramm zur Vormontageanlage	55

Abbildung 4.6: Darstellung des Problems, wenn zu viel Spiel bei der Rastkurvenpositionierung vorhanden ist	57
Abbildung 4.7: Prinzip Skizze zur Funktionsweise der Federleiste	59
Abbildung 4.8: Verteilungen vor und nach dem Einbau der Federleiste mit stetiger Normalverteilungsanpassung.....	60
Abbildung 4.9: Monte-Carlo-Simulationen mit unterschiedlichen Datengrößen	61
Abbildung 4.10: Regressionsplots mit gleichen Korrelationskoeffizienten.....	63
Abbildung 4.11: Qualitätsregelkarte mit 2 Phasen	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Übersicht eines SIPOC-Diagramms nach [GDW10]	10
Tabelle 4.1: SIPOC des Ultraschallschweißprozesses.....	47
Tabelle 4.2.: Grenzen für die Messsystemanalyse nach [TK09].....	49
Tabelle 4.3: Ergebnisse aus der attributiven Messsystemanalyse.....	51

Abkürzungen

<u>Akronym</u>	<u>Bedeutung</u>
AG.....	Arbeitsgang
ANOVA.....	Analysis of Variance
DES.....	Discrete Event Simulation
CTQ.....	Critical to Quality
DFSS.....	Design for Six Sigma
DMAIC.....	Define, Measure, Analyze, Improve, Control
FMEA.....	Fehlermöglichkeits- & Einfluss Analyse
LSL.....	Lower Specification Level
LSS.....	Lean Six Sigma
MSA.....	Messsystemanalyse
RACI-Diagramm.....	Responsible, Accountable, Consulted, Informed
SIPOC.....	Suppliers, Input, Process, Output, Costumer
SMD.....	surface-mounted device
USL.....	Upper Specification Level
VOC.....	Voice of the Customer
WT.....	Werkstückträger

1. Einleitung

Die internationale Wirtschaft hat sich heutzutage so entwickelt, das fernöstliche Unternehmen sich auf Augenhöhe mit amerikanischen und europäischen Topunternehmen sehen. Die sich immer weiter entwickelnde fernöstliche Wirtschaft, sorgt für steigende Anforderungen an deutschen Produktionsgütern. Um weiterhin wettbewerbsfähig bleiben zu können, müssen sich Unternehmen oft entscheiden, ob sie beispielsweise ihren Standort durch Outsourcing ins Ausland versetzen, Mitarbeiter entlassen um somit Kosten einzusparen oder in Verbesserungsmöglichkeiten investieren, wodurch ertragssteigernde Maßnahmen ergriffen werden können. Der Gedanke ist, die im Vergleich zur asiatischen Wirtschaft hohen Kosten, durch sehr gute Qualität zu legitimieren. Dabei ist es besonders wichtig die Prozesse gut untersucht zu haben, um so den maximalen Profit zu erzielen. Die Firma Leopold Kostal ist ein weltweit agierender Automobilzulieferer und bekannt für seine hochgradig automatisierten Produktionslinien. Dabei wird bei der Herstellung von vormontierten Blinker- und Scheibenwischerbaugruppen, das Ultraschallschweißverfahren angewendet. Beim Ultraschallschweißen in der Vormontageanlage der Firma Leopold Kostal, kam es in der Vergangenheit immer wieder zu Schwankungen in der Ausprägung und Qualität der Schweißpunkte, wodurch die weitere Verarbeitung der Vorbaugruppen gefährdet war. Der Fehler ist meistens erst am Ende der Produktionskette aufgefallen und hat dementsprechend hohe Kosten verursacht. Dadurch wurde ein Verbesserungsbedarf festgestellt. Dies machte sich die Firma Kostal zum Anlass den Prozess näher untersuchen zu lassen, um den Fehler zu beseitigen.

Dabei gilt als ein wichtiges Gebiet der Forschung und Entwicklung auf der einen Seite die Simulation von Prozessen. Es bietet einem Unternehmen die Möglichkeit, ein digitales Abbild der Prozesse zu erstellen und anhand dieses Modells Untersuchungen durchzuführen. Beispielsweise besteht vor der ersten Inbetriebnahme eines neuen Prozesses die Möglichkeit, diesen zunächst durch eine Simulation abzubilden, um mögliche Schwächen des Prozesses vorzeitig zu erkennen. Des Weiteren können vorhandene Prozesse ebenfalls auf ihre Schwächen untersucht werden. Der Vorteil der simulativen Betrachtung gegenüber der vor Ort Betrachtung eines Prozesses liegt darin, dass ein Simulationsmodell keine Stillstandzeiten verursacht. Hierbei können beliebige Veränderungen unternommen und jederzeit problemlos der ursprüngliche Zustand des Prozesses wiederhergestellt werden. Dies bietet dem Forschungsteam viel Flexibilität. Ferner kann eine Simulation auch zur Schulung von Mitarbeitern eingesetzt werden, wodurch die Effektivität der Mitarbeiter gesteigert werden kann. Durch ihren Variantenreichtum, stellt die Simulation für viele verschiedene

Einsatzorte eine gute Untersuchungsmöglichkeit dar. In dieser Arbeit werden die drei wichtigsten Simulationsarten: kontinuierliche Simulation, ereignisdiskrete Simulation und Monte-Carlo-Simulation ausgiebig untersucht und nach ihrer Anwendbarkeit bei der Lösung des Problems der Firma Leopold Kostal ausgewogen.

Auf der anderen Seite stellt die Six Sigma Methode eine weitere Methodik zur Untersuchung von Prozessen dar. Sie wird zum einen dazu genutzt, einen neuen Prozess zu designen. Diese Methodik wird als Design for Six Sigma (DFSS) bezeichnet. Es bietet einem Unternehmen die Möglichkeit einen Prozess so zu gestalten, dass der maximale Profit erzielt wird. Zum anderen bietet Six Sigma durch den Define-Measure-Analyze-Improve-Control-Zyklus (DMAIC-Zyklus) die Möglichkeit, bestehende Prozesse hinsichtlich der Kosten und Qualität zu verbessern. Die Untersuchungen durchlaufen Phase für Phase die verschiedenen Stadien des DMAIC-Zyklus, wodurch eine gut strukturierte und organisierte Arbeitsweise gewährleistet wird. Dabei baut Six Sigma ihre Aussagen auf Zahlen, Daten und Fakten auf, was diese Methode sehr transparent und dadurch beliebt macht. Außerdem ist nach [TK09] das Hauptziel von Six Sigma, die Anforderungen des Kunden vollständig und profitabel zu erfüllen. Das bedeutet für den Kunden, dass in jedem Falle seine betrieblichen Bedürfnisse befriedigt werden. Zusätzlich kann Six Sigma durch Lean Methoden unterstützt werden, wodurch beispielsweise die Verschwendung der Ressourcen beseitigt und eine effizientere Produktion gewährleistet wird. In diesem Zusammenhang wird von Lean Six Sigma gesprochen. In dieser Arbeit werden die wichtigsten Tools aus den verschiedenen Phasen vorgestellt.

Obwohl Simulation und Six Sigma meistens darauf abzielen ein System zu verbessern, werden sie in der Praxis zu selten in Kombination angewendet. Deshalb ist das Ziel dieser Arbeit, ein allgemeingültiges Konzept für die Integration von Simulation in Six Sigma zu entwickeln und dies am Beispiel der Ultraschallverschweißung zu verdeutlichen. Der Gedanke dabei ist, diese weit auseinander liegenden Gebiete (Simulation und Six Sigma) näher zu bringen, um die Vorteile beider Gebiete zu kombinieren und die Schwächen zu beheben. Des Weiteren wird der zur Kombination mit der Simulation passende Strang aus dem Six Sigma Umfeld herausgearbeitet. Im Hauptteil dieser Bachelorarbeit wird dann als Unterziel, auf die Vor- und Nachteile der verschiedenen Simulationsverfahren eingegangen, um somit das am besten geeignete Simulationsverfahren zur Integration in Six Sigma herauszuarbeiten. Außerdem werden alternative Anwendungsgebiete ferner des in dieser Arbeit dargestellten Problems der Firma Leopold Kostal mit dem Ultraschallschweißen vorgestellt. In der zweiten Hälfte des Hauptteils werden dann die Untersuchungen zur Verbesserung des Ultraschallschweißprozesses bei der Firma Leopold Kostal vorgestellt und es wird erläutert, wie die Simulation diese Untersuchungen unterstützen kann. Um für ein besseres Verständnis zu sorgen, wird im Folgenden zunächst die sich bei der Firma

Leopold Kostal befindende Vormontageanlage zur Herstellung von Scheibenwischer- und Blinkerbaugruppen eines weltweit bekannten Automobilherstellers vorgestellt. Im nächsten Schritt wird der sich in der Vormontageanlage der Firma Leopold Kostal befindende Prozess des Ultraschallschweißens näher betrachtet. Daraufhin wird der DMAIC-Zyklus als für diese Arbeit geeigneter Zweig von Six Sigma, Phase für Phase aufgearbeitet. Dabei werden die einzelnen Phasen mit ihren bekanntesten Werkzeugen vorgestellt. Danach werden drei Varianten der Simulation (kontinuierliche Simulation, ereignisdiskrete Simulation und Monte-Carlo-Simulation) vorgestellt. Es wird erläutert, wie die verschiedenen Arten der Simulation funktionieren und in welchen Anwendungsgebieten sie eingesetzt werden. Abschließend werden dann bereits vorhandene Verknüpfungsansätze von Simulation und Six Sigma aus vorhandener Literatur vorgestellt.

Durch diese Art und Weise, wird zum einen das Problem der Firma Leopold Kostal behoben und dadurch viele Kosten eingespart und zum anderen werden die Vorteile von Simulation und Six Sigma miteinander verbunden um mögliche Schwächen und Komplikationen der Verfahren zu beseitigen.

2. Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel wird zunächst die Vormontageanlage der Firma Leopold Kostal vorgestellt, in der auch der Ultraschallschweißprozess stattfindet. Anschließend wird die Six Sigma als eines der wichtigsten Statistik Methoden und danach die Simulation zur numerischen Untersuchung von Prozessen vorgestellt. Im letzten Abschnitt werden dann bereits vorhandene Verknüpfungsansätze dieser beiden Methoden vorgestellt.

2.1. Die Vormontageanlage und der Ultraschallschweißprozess

Die Firma Leopold Kostal GmbH & Co. KG „entwickelt und produziert technologisch anspruchsvolle elektronische, elektromechanische und mechatronische Produkte für bedeutende Industrieunternehmen.“ [Kostal] Kostal ist weltweit auf vier Kontinenten und an 46 Standorten vertreten und beschäftigt insgesamt 16.947 Mitarbeiter. [Kostal] In dem Sitz in Lüdenscheid, werden Teile für namhafte Automobilhersteller durch automatisierte Prozesse produziert. Hier befindet sich die Vormontageanlage, welche in dieser Bachelorarbeit thematisiert wird.

Bei der sogenannten Vormontageanlage handelt es sich um eine hochgradig automatisierte Anlage, welche die Baugruppen für den Scheibenwischer- und Blinkerhebel eines weltweit bekannten Automobilherstellers „vormontiert“. Diese vormontierten Baugruppen werden dann im nächsten Schritt, per Hand von einem Mitarbeiter in die entsprechenden Wischer und Blinker Gehäuse eingesetzt. Dabei läuft der Prozess folgendermaßen ab: Im Allgemeinen besteht die Vorbaugruppe aus einer Leiterfolie, einem Kunststoffträger, einer Kunststoffrastkurve und einem Kunststoffgehäuse für die Rastkurve. Als erstes müssen die Leiterfolien aus der SMD (surface-mounted device, nach [Plate16] eine Art, Bauelemente auf eine Leiterfolie anzubringen) Anlage, die als Nutzen vorliegen, vereinzelt werden. Dazu entnimmt ein Roboter einen Nutzen aus dem Wagen, auf dem die Nutzen gestapelt werden. Diese werden dann vom Roboter in die Aufnahme des Stanzwerkzeuges abgelegt und vom Werkzeug gestanzt. Dabei werden die Nutzen durch eine Ansaugung in Position gehalten. Im nächsten Schritt werden dann die vereinzelt Folien, vom selben Roboter auf sogenannte „WT's“ abgelegt. Diese „WT's“ sind sogenannte Werkstückträger, die sich auf einem Fließband bewegen und die Folien aufnehmen können. Mithilfe dieser WT's werden dann die Folien, der Vormontageanlage zugeführt. Durch ein Stoppersystem werden die WT's hintereinander gereiht. Ab diesem Schritt werden die Unterprozesse, welche sich unmittelbar vor oder nach dem Ultraschallschweißprozess befinden, in der folgenden Abbildung 2.1 dargestellt. Ein Roboter, welcher sich in der Vormontageanlage befindet, entnimmt nun im nächsten

Schritt jeweils eine Blinker- und Scheibenwischerleiterfolie und platziert diese in dem Aufnahmewerkzeug, wo es positionstreu abgelegt werden kann. Im folgenden Schritt sollen dann an diese Leiterfolien sogenannte Rastkurven und der Träger für die Tasten am Wischer und Blinker Hebel angebracht werden. Dafür wird von einem Schwenkarm eine Rastkurve entnommen und auf der dafür vorgesehenen Stelle auf der Leiterfolie platziert, die sich bereits in der vorgesehenen Position befindet. Dieser Schritt ist erforderlich, um die Positionierung der Folie zu unterstützen, da sonst die Folie lediglich durch die Ansaugung von unten festgehalten wird. Dabei kann es im schlimmsten Fall vorkommen, dass die Folie durch die Einflüsse der oben genannten Prozessschritte von ihrer Stelle abkommt. In diesem Falle werden die produzierten Teile nicht mehr brauchbar. Als nächstes wird dann von einem Greifer, ein Kunststoffträger (für die Taste) aus der Wartelinie entnommen und so unter die Leiterfolie geführt, dass die Kunststoffdome des Trägers, in die Löcher der Leiterfolie eingefahren werden. Durch das folgende Kaltverstemmen der Dome in vertikaler Richtung über der Leiterfolie, wird eine formschlüssige Verbindung hergestellt. Die verstemmten Dome haben dann eine ausgeprägte „Pilzform“. Dabei ist der Durchmesser des „Pilzkopfes“ größer als der Lochdurchmesser des Lochs auf der Leiterfolie, wodurch eine endgültige Verbindung der Leiterfolie mit dem Träger gewährleistet wird. Danach wird der Träger so verfahren, dass nun die Verbindung der Folie mit der Rastkurve ungestört stattfinden kann, ohne dass die Folie beschädigt wird.

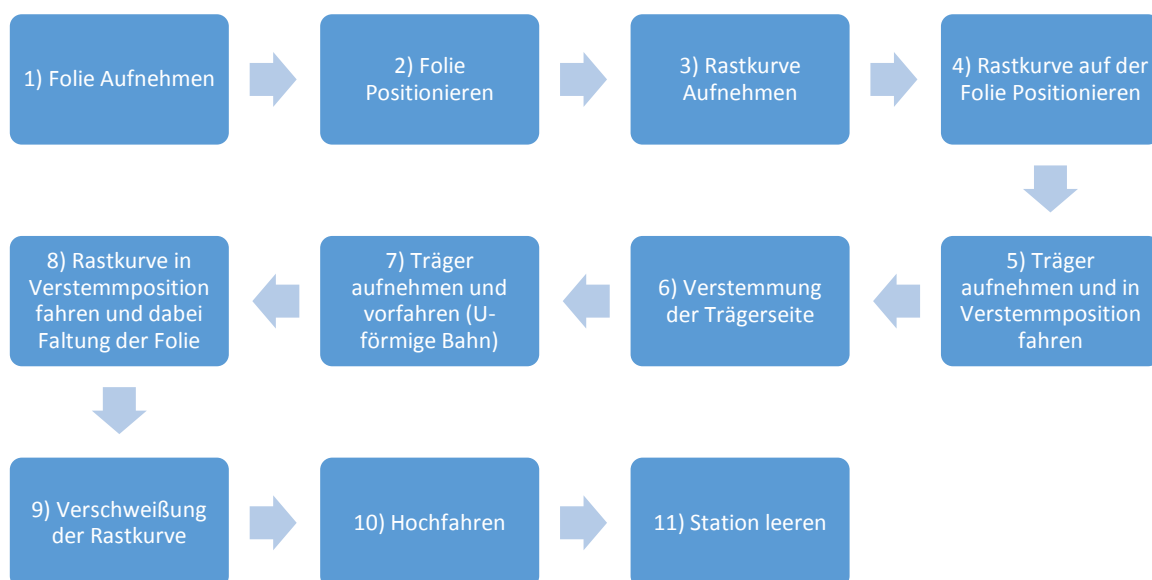


Abbildung 2.1: Verfahrensablauf beim Ultraschallschweißen

Dafür wird dann die Rastkurve „runtergedrückt“ und durch ein kompliziertes Faltverfahren wird die Leiterfolie, welche sich unterhalb der Rastkurve befand, um die Rastkurve gefaltet. Dabei treffen die Löcher der Leiterfolie erneut auf Kunststoffdome. Nachdem dieser Vorgang erfolgt ist, wird die Rastkurve mit der Folie bis zum

Endanschlag nach unten verfahren. Hier wird dann die Verbindung mithilfe eines Ultraschallschweißverfahrens ausgebildet. Dabei schwingt die sogenannte Sonotrode des Schweißwerkzeugs in Ultraschallgeschwindigkeit vor und zurück und sorgt dafür, dass die Kunststoffdome der Rastkurve, „pilzförmig“ über den Löchern der Leiterfolie geweitet werden. Hier gibt es in der Anlage einen Unterschied bei der Steuerung der Sonotrode. Der vordere Teil, wo sich die vier Dome der Rastkurve befinden, arbeitet zeitgesteuert. Dies bedeutet, dass die Sonotrode immer eine bestimmte Zeit lang hin und her schwingt. Auf der hinteren Seite, wo sich zwei Dome der Rastkurve befinden, arbeitet leistungsgesteuert. Dies bedeutet, dass das System immer die gleiche Leistung aufbringt und den Widerstand der Dome merkt. Dieser Vorgang kann also unterschiedlich lange dauern. In der nachfolgenden Abbildung 2.2 nach [KLN16] werden die Grundbestandteile des Ultraschallschweißprozesses dargestellt.

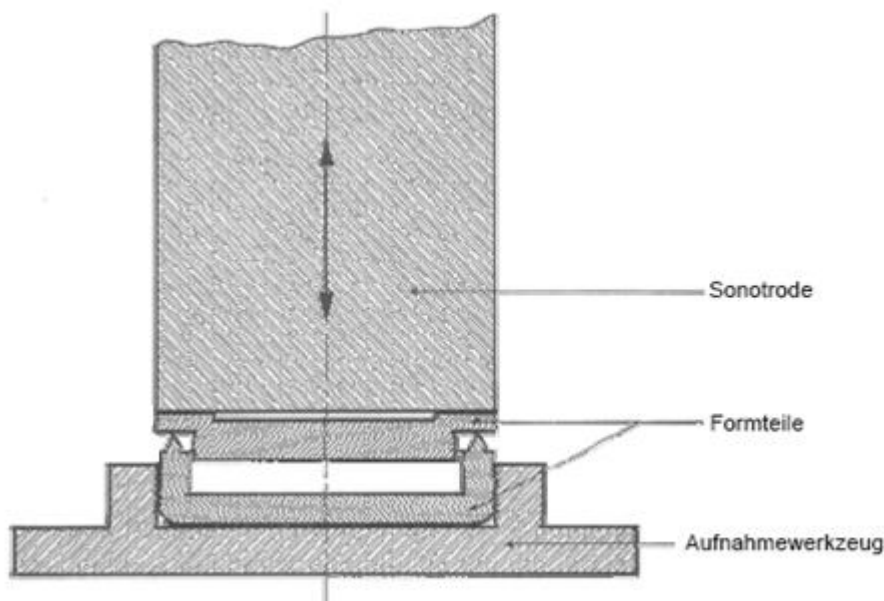


Abbildung 2.2: Prinzip des Ultraschallschweißens nach [KLN16]

Durch dieses Verfahren entsteht auch hier eine formschlüssige Verbindung. Die fertigen Baugruppen werden dann von einem weiteren Roboter entnommen und die Rastkurve wird nochmal in ein Gehäuseteil eingesetzt. Diese Vorgänge geschehen simultan beim Wischer und beim Blinker. Für die oben beschriebenen Prozessschritte, benötigt die Anlage eine Prozesszeit von etwa 10 Sekunden, ab Entnahme der Folie von einem WT, bis zum Einsetzen der verschweißten Bauteile in ein Kunststoff Gehäuse. Es folgen noch einige weitere Schritte, die aber im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht behandelt werden.

2.2. Six Sigma: Das statistische Qualitätswerkzeug

Unter den statistischen Verbesserungsmethoden stellt Six Sigma eine der Königsdisziplinen dar. Mit ihren vielfachen und international anerkannten Fortbildungsmöglichkeiten von Green Belt bis hin zu Master Black Belt und Champion, bietet Six Sigma eine klar strukturierte Möglichkeit der Aufgabenteilung [GJ15]. Nicht zuletzt deswegen hat Six Sigma das Interesse von namhaften Unternehmen wie z.B. Motorola, Ford oder General Electric geweckt und von ihnen weiterentwickelt [SBH10]. Neben dem Einsatz zur Verbesserung von Banken und Versicherungen [Topf07] oder in der chemischen Industrie [WH09] findet die Six Sigma heutzutage sogar bei der Untersuchung von Krebspatienten [CTKSKÖ16] ihre Anwendung. Als eine Art Gruppenaufgabe fördert Six Sigma die Teamfähigkeit der beteiligten Personen. In der Regel dauern Six Sigma Projekte, je nach Umfang der Aufgabe 3 bis 6 Monate und liefern nachhaltige Ergebnisse [GJ15].

Die Tatsache, dass Six Sigma auf Zahlen, Daten und Fakten aufbaut, macht es zu einer nachvollziehbaren Managementmethode. In der Regel wird versucht, das vorliegende Problem so zu Operationalisieren, dass der bzw. die Störfaktor/en zu einer messbaren Größe definiert werden. Dabei wird sich an den Wünschen des Kunden orientiert, was dieses Verfahren ebenfalls sehr beliebt macht. Auf diese statistische Grundlage können dann die weiteren Grundbausteine gelegt werden. Produziert ein Unternehmen Güter erfolgreich nach Six Sigma, so ist eine Ausfallquote von 3,4 ppm bei einer Normalverteilung zu erwarten [GDW10]. Dies ist eine sehr hohe Quote. Es gibt viele Fälle, in denen dieses hohe Niveau trotzdem nicht ausreicht. Beispielsweise fanden am Frankfurter Flughafen im Jahre 2005 insgesamt 500.000 Landungen statt. Würde also der Flughafen mit einem Sechs Sigma Niveau arbeiten, würden jährlich 1,7 Flugzeugunfälle stattfinden, was nicht zu akzeptieren ist. [TK09] Ferner gehen beispielsweise jährlich bei 2 Mrd. Flugpassieren insgesamt 30 Mio. Gepäckstücke verloren. Dies entspricht einem Sigma Niveau von ca. 3,7. Hier also auf dem Six Sigma Niveau zu arbeiten wäre sehr unwirtschaftlich. Dies zeigt, wie genau und präzise ein Prozess nach Six Sigma arbeiten kann, falls dies vom Kunden erwünscht und wirtschaftlich realisierbar ist [TK09]. Außerdem ist Six Sigma in nahezu allen Branchen und sogar im Alltag anwendbar. Die Tatsache, dass Six Sigma sehr viele Tools beinhaltet, sorgt dafür, dass für jede Herausforderung das passende Tool gefunden wird. Bekannte Werkzeuge sind beispielsweise, einfache Diagramme wie Box-Plots oder ein Ishikawa-Diagramm (Fischgrätendiagramm), aber auch eine ANOVA (analysis of variance) oder FMEA (Fehlermöglichkeits- & Einfluss Analyse) Untersuchung sind häufig angewendete Werkzeuge. Six Sigma kommt vor allem dann zum Einsatz, wenn die Ursache für ein Fehlerbild unbekannt ist. Es ist also sehr vielversprechend, doch es hat auch einen Preis.

Six Sigma benötigt viele qualifizierte Mitarbeiter. Das Erlangen einer „Green-Belt“ Zertifizierung z.B. ist bereits mit Kosten verbunden. Vor einem Projekt, muss eine Kostenbilanz gezogen werden, denn das Unternehmen muss viele qualifizierte Mitarbeiter für ein Six Sigma Projekt bezahlen. Falls dann jedoch die versprochenen Einsparungen, unter den Kosten des Projektes bleiben, dann rentiert es sich nicht und es kommt erst gar nicht zu einem Six Sigma Projekt. Hinzu kommt, dass die Statistik Software meist eine teure Jahreslizenz von zum Teil bis zu 1000€ erfordert. Des Weiteren, liefert die Six Sigma Untersuchung aufgrund der Zeitintensivität im schlimmsten Fall extrem zeitverzögert Ergebnisse. Dies kann noch längere Stillstandzeiten bedeuten, was den Rahmen der Projektkosten sprengen könnte. So muss in jedem Falle vorher abgewogen werden, ob es sich lohnt ein Problem mithilfe von Six Sigma zu lösen.

Six Sigma umfasst 2 Modelle. Zum einen gibt es das Design for Six Sigma (DFSS) und zum anderen den DMAIC-Zyklus (Define-Measure-Analyze-Improve-Control Zyklus) [EA06]. Der entscheidende Unterschied liegt darin, dass DFSS präventiv und DMAIC reaktiv ist. DFSS wird eingesetzt, wenn ein neuer Prozess effektiv gestaltet werden soll. DMAIC wird eingesetzt, wenn ein vorhandener Prozess verbessert werden soll. Des Weiteren wird Six Sigma auch oft als Lean Six Sigma (LSS) angewendet. Im Prinzip beschreibt Lean, Möglichkeiten einen Prozess noch effektiver zu machen. Somit wird ein Prozess erzielt, der zum einen sehr ressourcenschonend und günstig produziert und zum anderen fehlerfrei arbeitet. Dieser Zusammenhang wird in der folgenden Abbildung 2.3 aus [EA06] noch einmal übersichtlich dargestellt.

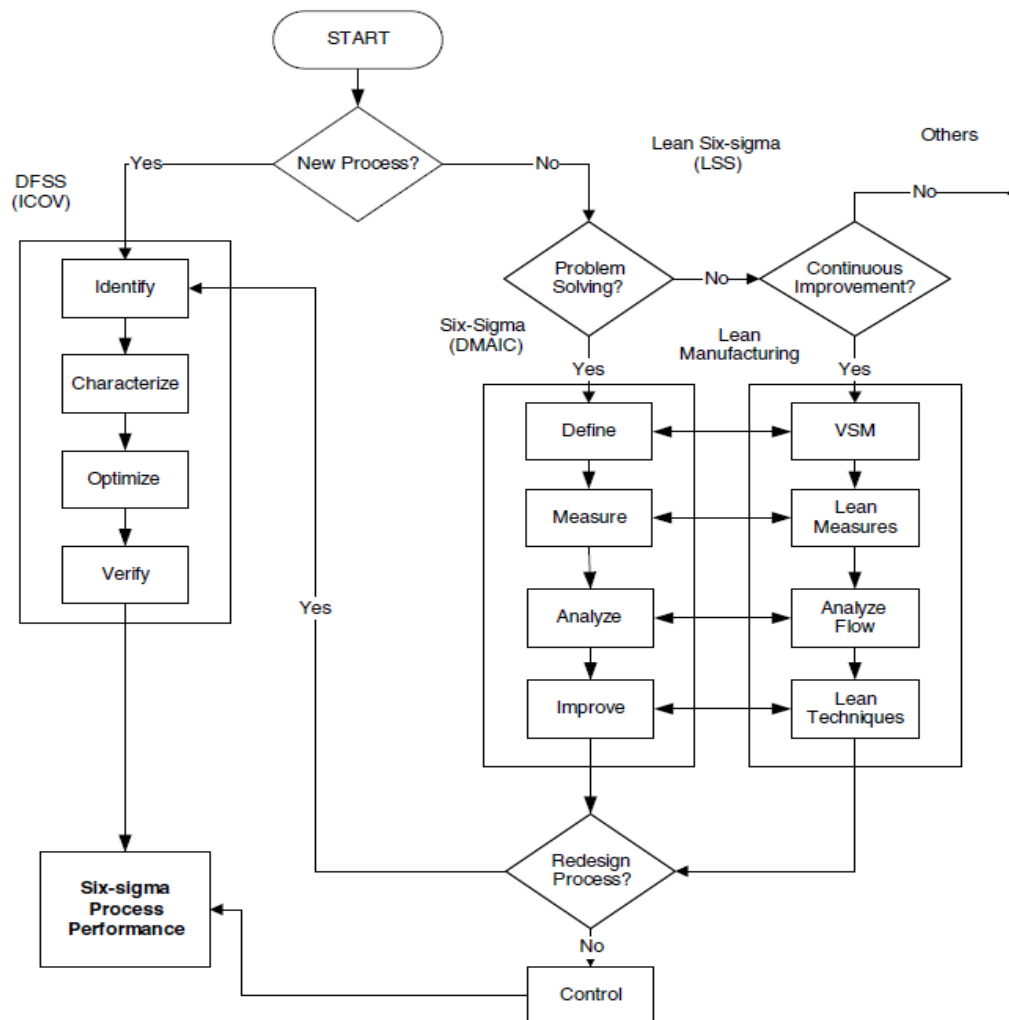


Abbildung 2.3: Gegenüberstellung von LSS, DMAIC und DFSS [EA06]

In dieser Arbeit wird der DMAIC-Zyklus angewendet, da die Arbeit entlang einer Praxisaufgabe in Kooperation mit der Firma Kostal orientiert ist und ein vorhandenes Fehlerbild abschaffen soll. Der DMAIC-Zyklus beinhaltet die 5 Phasen: Define, Measure, Analyze, Improve und Control. Diese kalkülartige Vorgehensweise sorgt dafür, dass Störfaktoren systematisch beseitigt werden können und anschließend die Stabilität des Systems gewährleistet ist. Im Folgenden werden die 5 Phasen von Six Sigma näher erläutert.

2.2.1. Define: Projektdefinition und -verständnis

Die Six Sigma Untersuchung beginnt mit der Define Phase. In dieser Phase ist es wichtig, den Prozess gut zu verstehen um dann das Problem hinreichend genau zu definieren. Es muss als erstes geprüft werden, ob das vorliegende Problem mithilfe einer Six Sigma Untersuchung beseitigt werden kann. Bei der Projektauswahl muss beachtet werden, ob Six Sigma die richtige Methode dafür ist. Des Weiteren muss vorher geprüft werden, ob genug Ressourcen für die Untersuchungen zur Verfügung stehen. [TK09]

Als nächster Schritt erfolgt dann die Teamgründung. Üblicherweise gehört zu einem Team ein Champion, welcher im Prinzip der Projekt Sponsor ist und das Bedürfnis hat, eine Verbesserung eines Prozesses, welcher unter seiner Verantwortung steht, durchzunehmen, ein Master Black Belt, ein Black Belt und ein Green Belt. Bei der Auswahl der Teammitglieder sollte berücksichtigt werden, dass diese Personen über die Dauer des Projektes verfügbar sein sollten. [TK09]

Anschließend wird ein vorläufiger Projektsteckbrief erstellt. Der Projektsteckbrief enthält die Problemdefinition, den Projektumfang, Kosten, sowie voraussichtliche Einsparungen, das Ziel der Untersuchungen, die Aufzählung der Teammitglieder, sowie deren Rollen und z.B. Meilensteine. Dieser Steckbrief muss am Ende der Define Phase noch durch das Projektteam validiert werden. Dafür muss in Betracht gezogen werden, ob das Projekt durchführbar ist und welche Auswirkungen es auf den Geschäftsprozess mitbringt. Nachdem die Machbarkeit des Projektes bestätigt wurde, muss nun der Prozess in seine Unterschritte zerlegt werden, um für ein besseres Verständnis zu sorgen. [TK09]

Ein sehr hilfreiches Tool, was sehr oft Anwendung findet und in Tabelle 2.1 dargestellt ist, ist die sogenannte SIPOC. Dabei ist SIPOC eine Abkürzung für Suppliers, Inputs, Process, Outputs und Customers. Die SIPOC dient dazu, sich schnell einen Überblick zu erschaffen. Außerdem ist es eine einfache Art, wichtige Prozessbeteiligte zu identifizieren. Des Weiteren wird mit einer SIPOC-Tabelle, der Prozess in die zu untersuchenden Prozessschritte eingegrenzt [TK09]. Mit diesem Werkzeug wird die erste kontrollierte und organisierte Ansicht des Prozesses erstellt. Dadurch wird der Grundstein für die Anwendung der DMAIC-Methode gelegt [GDW10].

Tabelle 2.1: Übersicht eines SIPOC-Diagramms nach [GDW10]

S wie Suppliers: Zulieferer	Zulieferer sind z.B. Systeme, Menschen, Organisationen
I wie Input: Eingangsgrößen	Eingangsgrößen sind z.B. Materialien, Daten und sonstige Ressourcen
P wie Process: Prozess	Der Prozess umfasst alle Vorgänge die den Input in Output verwandeln
O wie Output: Ergebnisse	Die Ergebnisse sind Ausgangsgrößen des Prozesses, welche der Kunde verwendet
C wie Customer: Kunde	Kunden sind Personen, Unternehmen oder z.B. nachgelagerte Prozesse, für die der Output des Prozesses bestimmt ist

Ist der Prozess genauestens beschrieben und ein ausführlicher Überblick wurde erschaffen, ist es an der Reihe die Kundenwünsche und -anforderungen festzuhalten. Es ist eins der wichtigsten Schritte in der Define Phase, da hiermit vermieden werden kann, dass der Kunde am Ende unzufrieden ist. Dafür müssen die Wünsche des Kunden aufgefasst und in eine messbare Größe operationalisiert werden, da sich die Kundenzufriedenheit schlecht messen lässt. Dieser Sachverhalt wird als Voice of the customer (VOC) beschrieben. Um also diese Qualitätsmindestanforderungen zu „übersetzen“, kommen in der Praxis oft Critical to Quality-Bäume (CTQ-Bäume) zum Einsatz. [GJ15]

Die folgende Abbildung 2.4 stellt diesen Sachverhalt, am Beispiel von einer Werkstatt übersichtlich dar. Als Kundenwunsch wird beispielsweise zunächst nur geäußert, dass Reparaturen zu lange dauern würden. Als Kundenbedürfnis leitet sich dann der Wunsch zur Senkung der durchschnittlichen Reparaturdurchlaufzeit ab. Von diesem Kundenbedürfnis wird dann als Outputmerkmal die durchschnittliche Reparaturdurchlaufzeit festgehalten. So ist also sichergestellt, dass messbare Größen existieren, um am Ende die Kundenzufriedenheit zu gewährleisten. Dies unterstreicht wiederum den Charakter von Six Sigma, alle Folgerungen auf Zahlen, Daten und Fakten aufzubauen und diese nah an den Kundenwünschen anzulegen.

Voice of the customer (VOC)	Kundenbedürfnis (Problem, Bedarf, Sorge)	CTQ-Outputmerkmal
Die Reparaturen dauern zu lange	Senkung der durchschnittlichen Reparaturdurchlaufzeit	Durchschnittliche Reparaturdurchlaufzeit
Wir haben zu viele Langläufer-Reparaturen	Steuerung der Reparaturen	Anzahl der Vorgänge, die ein aktives Eingreifen erfordern (Dauer >20 Werktage)
Es gibt keine Informationen über den Stand der Reparatur	Bereitstellung von Informationen zum Reparaturstatus	Anzahl der Anfragen bez. Reparaturstatus
Die Ersatzteil- oder Pool-Bestände (Lager) sind zu hoch	Niedrigere Bestände	Anzahl von Teilen, die gekauft wurden, während ein identisches Teil im Reparaturprozess war

Ungefilterte Aussage des Kunden	Was ist das tatsächliche Problem des Kunden? Was will der Kunde?	Messbare Anforderung in Abstimmung mit dem Kunden
---------------------------------	---	---

Abbildung 2.4: Critical to Quality Baum einer Kundenhotline aus [TK09]

Mit dem validierten Projektsteckbrief geht die Define Phase zu Ende. Es sollte ein Verständnis für das Projekt und die Forderungen des Kunden entwickelt worden sein.

2.2.2. Measure: Prozessverhalten aufzeichnen

Nach erfolgreich abgeschlossener Define Phase, sind die Projektziele und Meilensteine definiert, jedes Teammitglied hat eine Aufgabe zugeordnet bekommen und die Measure Phase kann starten. Wie bereits der Name sagt, geht es hier darum den Prozesscharakter aufzuzeichnen.

Dazu muss zunächst betrachtet werden, ob bereits Zahlen und Daten vorliegen und wenn ja, in welcher Art und Weise. Dabei wird zwischen stetigen bzw. diskreten Daten und attributiven Daten unterschieden. Stetige bzw. diskrete Daten sind beispielsweise eine gewisse Fettmenge, Anzahl der Schlechttteile pro Stunde, Durchmesser usw.

Oftmals liegen Daten allerdings nur in Form von „in Ordnung“ (i.O.) und „nicht in Ordnung“ (n.i.O.) vor. Diese Art von Daten wird als attributiv bezeichnet. Diese Unterscheidung ist wichtig, da die im Folgenden dargestellten Methoden, je nach Art der Daten unterschiedlich sind. Falls keine Zahlen und Daten vorliegen, müssen sie als erstes ermittelt werden. Dabei sollte die Stichprobengröße nicht zu klein gewählt werden, da sonst die Ergebnisse nicht repräsentativ sein könnten. Die Stichprobengröße kann auch anhand der folgenden Formel in Abbildung 2.5 aus [TK09] ermittelt werden.

Stetige Daten	1. Fragestellung: Aussage über den Erwartungswert (μ)	$n \geq \left[\frac{z_{1-\alpha/2}}{\Delta} \right]^2 \cdot \sigma^2$
Diskrete Daten (binär)	2. Fragestellung: Aussage über den Fehleranteil (p)	$n \geq \left[\frac{z_{1-\alpha/2}}{\Delta} \right]^2 \hat{p}(1 - \hat{p})$

Dabei sind:

- $z_{1-\alpha/2}$ das $(1-\alpha/2)$ 100 %-Quantil der Standardnormalverteilung.
- σ die Standardabweichung. Ist diese nicht bekannt, so muss sie durch die Stichprobenstandardabweichung s geschätzt werden (siehe Abschnitt 3.2.8).
- \hat{p} der geschätzte Anteilswert (z. B. grob geschätzter Fehleranteil).
- Δ die Genauigkeit (Zielwert $\pm \Delta$).

Abbildung 2.5: Formel zum Einschätzen der Stichprobengröße aus [TK09]

Dabei sollte die ermittelte Stichprobengröße keinesfalls als fest definierte Größe verstanden werden. Vielmehr dient die vorherige Berechnung dazu, um den Aufwand einzuschätzen. Somit sollte klar sein, dass allein durch die vorherige Berechnung der Stichprobengröße, die statistische Sicherheit noch nicht gewährleistet ist. [TK09]

Liegen die Daten vor, bieten sich sehr viele Möglichkeiten an diese Daten graphisch darzustellen. Die wohl bekannteste und am meisten verwendete Art der Darstellung,

bei stetigen Werten, sind Histogramme. Oft werden auch Box-Plots, Pareto-Diagramme und Streudiagramme zur Illustration verwendet.

Um jedoch weiterführende Analysen durchführen zu können, ist es wichtig und erforderlich, die ermittelten Daten auf ihre Richtigkeit zu prüfen. Dabei spielt besonders das Verhalten des Messsystems eine große Rolle. Deshalb muss das Messsystem auf ihre Fähigkeit überprüft werden. Es wird als Messsystemanalyse (MSA), bzw. Messmittel-Fähigkeitsanalyse oder Prüfmittel-Fähigkeitsanalyse bezeichnet [TK09]. Liegt ein unfähiges Messsystem vor, so ist es nicht sinnvoll weiterführende Untersuchungen und Entscheidungen auf den ermittelten Werten aufzubauen, da die statistische Sicherheit nicht gewährleistet ist. Dieser Fall liegt beispielsweise bei einer ungeeichten Waage vor. Deshalb wird zwischen zwei Typen von Messabweichungen unterschieden, die erst ausgeschlossen werden müssen, um von der Korrektheit der Daten ausgehen zu können. Unter Typ 1 gehören die Messabweichungen: Genauigkeit, Wiederholpräzision und Vergleichspräzision. Dabei wird die Genauigkeit des Messsystems durch wiederholtes Messen von dem gleichen Prüfling, mit anschließendem Vergleich des Mittelwerts der mehrfachen Messungen, mit dem Sollwert des Prüflings ermittelt. Die Wiederholpräzision eines Messsystems wird kontrolliert, indem derselbe Prüfling vom selben Prüfer am selben Ort mit demselben Prüfmittel gemessen wird. Das Maß für die Wiederholpräzision ist dann die Standardabweichung der Messreihe. Die Vergleichspräzision wird ermittelt, wenn derselbe Prüfling, am gleichen Ort und mit demselben Prüfmittel von verschiedenen Prüfern mehrmals gemessen wird. Ein Maß für die Vergleichspräzision ist dann der Unterschied zwischen den ermittelten Mittelwerten der Messungen. [SSM]

Unter Typ 2 von Messabweichungen gehören die (zeitliche) Stabilität und Linearität. Die Stabilität eines Messsystems wird dabei ermittelt, indem derselbe Prüfer, den gleichen Prüfling, mit dem gleichen Prüfmittel mit gewissen Zeitabständen mehrmals vermisst. Das Maß für die zeitliche Stabilität ist dann der Unterschied zwischen den Mittelwerten der einzelnen Messungen. Die Ermittlung der Linearität erfolgt, indem der gleiche Prüfer, mit demselben Prüfmittel und am gleichen Ort, mehrere Messungen an verschiedenen Prüflingen durchführt, die dabei den gesamten, in der Praxis zu erwartenden Messbereich abdecken sollten. [SSM]

Anschließend wird für jedes Prüfling der Mittelwert aus den Messungen gebildet und die Genauigkeit wird betrachtet. Falls Unterschiede in den Abweichungen bestehen, die nicht zufällig sind, dann ist das Messsystem als nichtlinear einzustufen [SSM]. Je nachdem ob die Daten stetig bzw. diskret oder attributiv vorliegen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die Messsystemanalyse durchzuführen.

Um die ermittelte Information besser auswerten zu können, ist es hilfreich, diese Werte in eine sogenannte Kontrollkarte, wie es in der folgenden Abbildung zu sehen ist einzutragen. Es gibt viele Arten von Kontrollkarten. Bei attributiven Kontrollkarten, werden beispielsweise zu Beginn und am Ende einer Schicht 10 Bauteile begutachtet und entschieden ob diese in Ordnung sind oder nicht. Je nach Unternehmenskriterien lässt sich dann sagen, dass bei der Beurteilung in verschiedenen Schichten, durch verschiedene Kontrollinstanzen, die Anzahl der Schlechteile, eine bestimmte Grenze nicht überschreiten darf. Was die verschiedenen Kontrollkarten unterscheidet ist, welche Art von Merkmal sie betrachten und was als mittlerer Wert angenommen wird. Es gibt z.B. Kontrollkarten, wo der arithmetische Mittelwert der Schätzer ist. Diese Karten sind die bekanntesten. Des Weiteren gibt es auch Karten, wo der Median oder die Standardabweichung der Schätzer für den mittleren Wert ist. Sie bestehen jedoch alle aus oberen und unteren Kontroll- und Warn Grenzen. Die Warn Grenzen sind so gesetzt, dass 95% der Daten in diesem Bereich liegen. Es wird als 95%-Konfidenzintervall bezeichnet. Hier sollten nach Möglichkeit alle Werte liegen. Dann ist das System als stabil zu bezeichnen. Liegen Werte zwischen der Warn Grenze und dem 99%-Konfidenzintervall (also der Kontrollgrenze), sollte überlegt werden, wie diese Werte zustande gekommen sind. Falls sie rein zufällig passiert sind, sollte der Prozess im Auge behalten werden. Veränderungen durchzunehmen ist an dieser Stelle noch nicht nötig. Liegen Werte allerdings jenseits der Kontrollgrenzen, so ist der Prozess statistisch nicht mehr unter Kontrolle und es müssen Maßnahmen ergriffen werden, um den Prozess wieder unter Kontrolle zu bringen. [SSM]

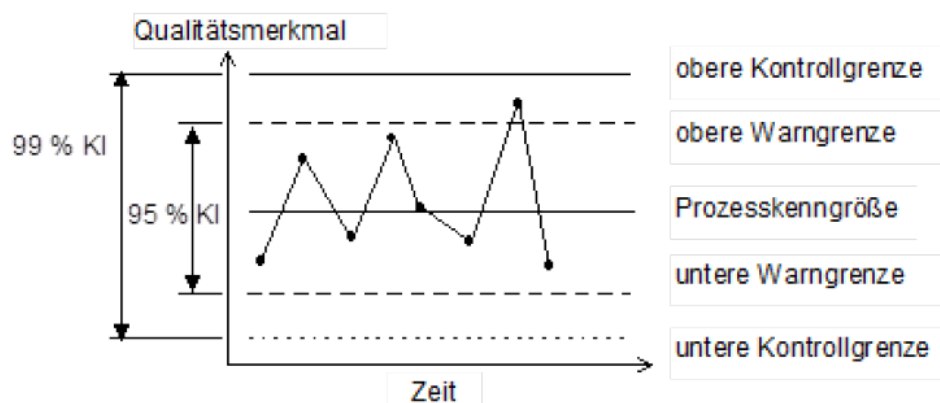


Abbildung 2.6: Aufbauschema einer Kontrollkarte [SSM]

Schließlich ist ein statistisches Abbild des Prozesses erschaffen worden und es werden anschließend Kriterien benötigt, um die sogenannte Fähigkeit des Prozesses zu beschreiben. Das Vorhandensein von Qualitätskriterien wie z.B. Sollwert und sogenannte Spezifikationsgrenzen ist eine Grundvoraussetzung. Es existiert eine obere und untere Spezifikationsgrenze, die gleichmäßig um den Sollwert liegen. Ein Prozess ist also fähig, wenn er Güter in Übereinstimmung mit den Spezifikationen produzieren

kann [SSM]. Um diese Fähigkeit zu beschreiben, existiert z.B. der Prozessfähigkeitsindex C_p . Er wird wie folgt berechnet:

$$C_p = \frac{USL-LSL}{6\sigma} \quad (2.1.)$$

Dabei ist USL die obere und LSL die untere Spezifikationsgrenze (Upper und Lower Specification Limit). Als Schätzer für σ dient die Standardabweichung. Liegt also ein Prozessfähigkeitsindex von 1 vor, so produziert der Prozess zu 99,73% Teile, die innerhalb den Spezifikationsgrenzen liegen. Das würde bedeuten, dass der Prozess als fähig einzustufen ist.

2.2.3. Analyze: Analysieren des vorliegenden Problems

Nach erfolgreich abgeschlossener Measure Phase, liegt ein statistisches Systemabbild vor. Die Korrektheit der Daten wurde mithilfe einer Messsystemanalyse bewiesen. Des Weiteren wurde der Prozess in einer Kontrollkarte abgebildet und mithilfe von vorgegebenen Spezifikationsgrenzen, der Prozessfähigkeitsindex ermittelt. In der darauf folgenden Analyze Phase, muss herausgefunden werden, warum der Prozess eine niedrige Fähigkeit besitzt. Das wohl bekannteste Werkzeug der Analyze Phase ist ein Ursache-Wirkungs-Diagramm. Es wird auch als Fischgräten- oder Ishikawa-Diagramm bezeichnet. Es stellt dabei eine Erleichterung beim Brainstorming her und hilft dabei, Einflussfaktoren sortiert und übersichtlich darzustellen. Somit ist es möglich, einfach zwischen Symptom und Ursache zu unterscheiden. Dabei werden zunächst als Hauptkategorien, die sogenannten „6 Ms“ aufgeschrieben. Damit sind die Kategorien: Mensch, Maschine, Material, Messverfahren, Methode und Mutter Natur (Umwelteinflüsse) gemeint. Diesen Überschriften, werden dann Symptome untergeordnet. Um den Grund für die Symptome herauszufinden, werden die „5 Warum“ Fragen beantwortet. Somit wird im Prinzip, Ebene für Ebene tiefer in Richtung der Ursache vorgegangen. Somit werden die Symptome „siziert“. In der nachfolgend dargestellten Abbildung 2.7, ist ein typischer Aufbau eines Fischgrätendiagramms, zu einem fiktiven Problem dargestellt. [SHBMMR13]

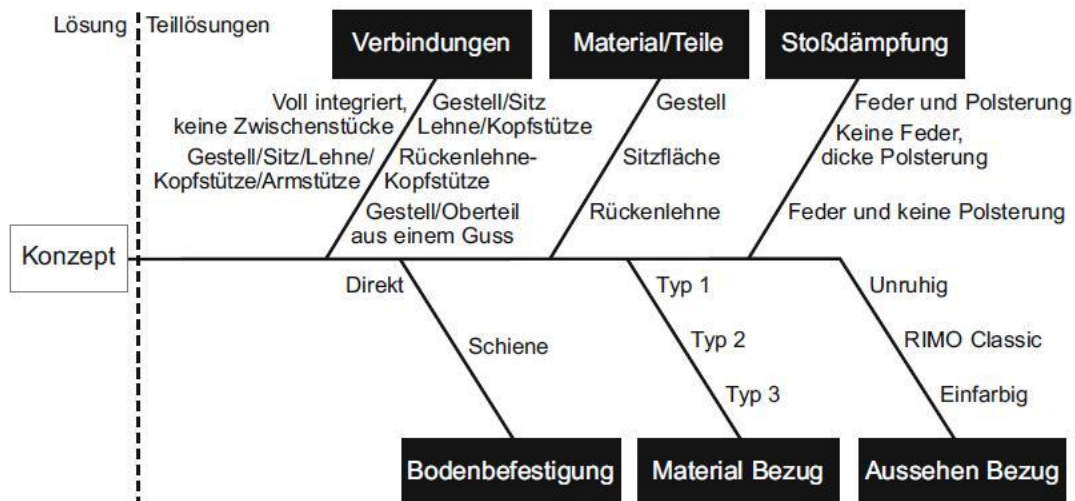


Abbildung 2.7: Ishikawa-Diagramm [SHBMMR13]

2.2.4. Improve: Lösungen finden und umsetzen

Ist die Analyse Phase zu Ende, müssten die wichtigsten Probleme des Prozesses bekannt sein. Anschließend müssen für die Probleme, passende Abhilfemaßnahmen gefunden werden. Dazu wird z.B. ein einfaches Brainstorming verwendet, denn es ist ein sehr schnelles Verfahren und liefert sehr viele Ideen. Am besten wird ein Brainstorming in einer Gruppe durchgeführt, denn verschiedene Menschen haben einen verschiedenen Blickpunkt zu einem Problem. Somit kommt es zu mehr Lösungsansätzen. Dabei ist es besonders wichtig, jede Idee zu respektieren und nicht sofort auszuschließen.

Nachdem mögliche Lösungsansätze gefunden wurden, muss über die Implementierung nachgedacht werden. Dabei sollte nicht vergessen werden, dass der finanzielle Aufwand, den Ertrag der Lösung nicht überschreiten sollte. Ist diese Tatsache gewährleistet, sollte überlegt werden, an welcher Stelle des Prozesses die Veränderung eingebracht werden kann. Möglicherweise müssen Abläufe verändert werden. Falls dies der Fall ist, empfiehlt es sich einen neuen Prozessplan zu erstellen. Schließlich müssen nur noch Zuständigkeiten abgeklärt werden. Um systematisch vorgehen zu können, muss also akribisch genau festgehalten werden, welches Teammitglied, welche Verantwortungen übernehmen muss. Dafür gibt es bekannte Werkzeuge, wie z.B. ein RACI- Diagramm, worauf aber an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. [SSM] Am Ende dieser Phase sollte beachtet werden, welche möglichen Risiken bestehen. Probleme die aufgrund der Veränderung als Konsequenz auftreten können, müssen im Vorfeld erfasst und wenn möglich bereits mit einer Lösung versehen werden. Um den Zeitraum der Testphase möglichst kosteneffizient zu durchlaufen, ist dieser Schritt von grundlegender Bedeutung. Denn tauchen unerwartete Probleme in einem frühen Stadium auf, kommt eventuell ein Testlauf gar nicht so weit, bis die

Funktion der Veränderung überprüft werden kann. Die gängigste Methode dafür, stellt die FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse) dar [GDW10].

2.2.5. Control: Kontrolle des Prozesses

Hat sich in der Improve Phase eine geeignete Lösung finden lassen, wird die Implementierung dieser Lösung in der Control Phase durchgeführt. Nachdem die Lösung in den Prozess integriert wurde, ist das Ziel eine nachhaltige Lösung durch statistische Methoden zu belegen. Dabei kommen erneut die aus der Measure Phase bekannten Kontrollkarten zum Einsatz. Oftmals werden die aktuell ermittelten Werte mit dem ursprünglichen Zustand in die gleiche Kontrollkarte eingetragen wie in Abbildung 2.8. So besteht ein direkter Vergleich und es lässt sich einfacher sagen, ob die Maßnahme sinnvoll war.

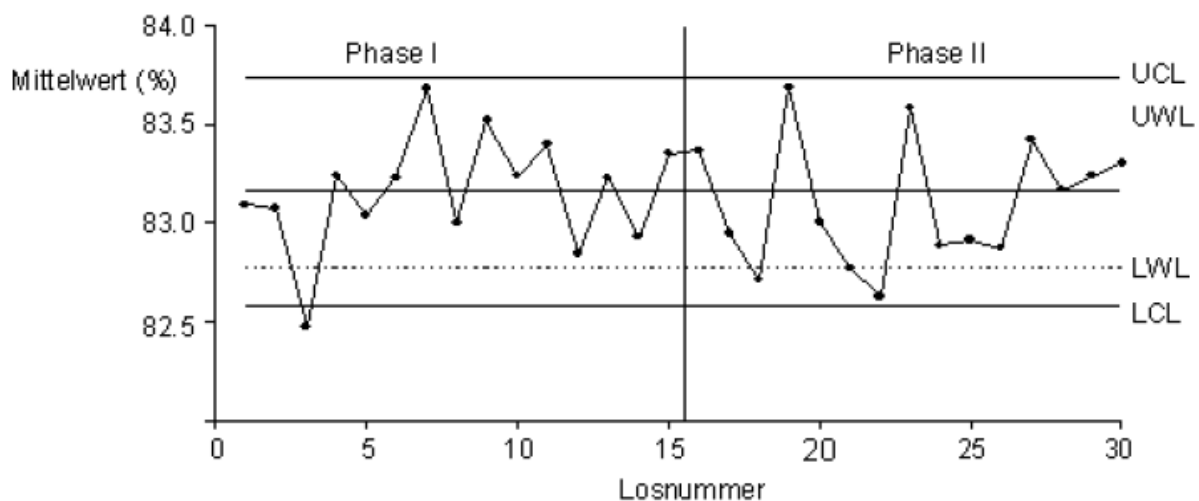


Abbildung 2.8: Kontrollkarte mit 2 Phasen [SSM]

Ähnlich wie in der Measure Phase wird nun der neue Prozessfähigkeitsindex berechnet. Dieser sollte im Vergleich zum ursprünglichen Prozessfähigkeitsindex besser sein. Des Weiteren sollten auch graphische Darstellungen als Kontrolle der Verbesserung herangezogen werden. So sollte nach [TK09] der neue Prozesszustand eine viel geringere Streuung und somit einen höheren Sigma Wert aufweisen können wie dies in Abbildung 2.9 der Fall ist.

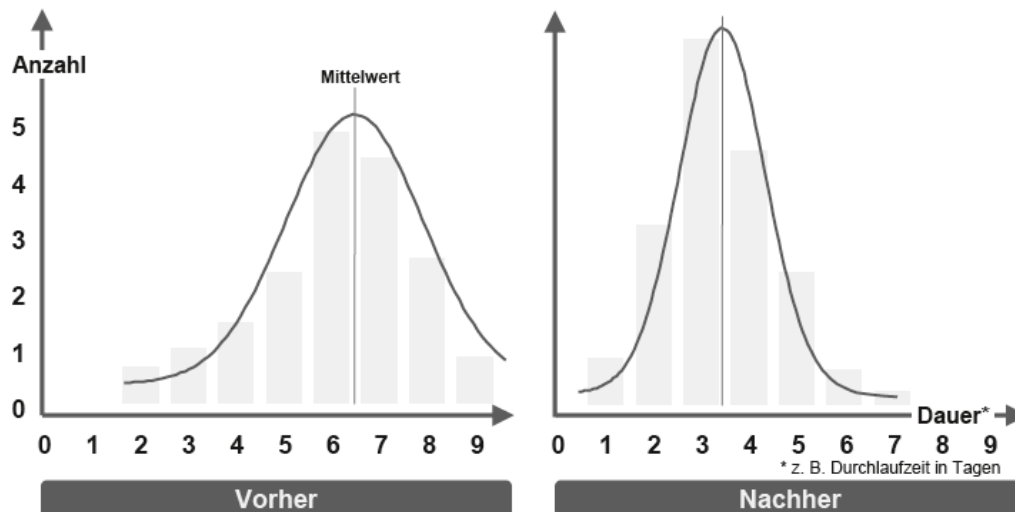


Abbildung 2.9: Vergleich der Prozessstreuung zwischen dem alten und neuen Stand eines fiktiven Prozesses [TK09]

Damit liegt also eine Bestätigung der Verbesserungen, auf Basis von statistischen Daten vor. Die Control Phase wird beendet, indem ein Kontrollplan aufgestellt wird. In diesem Kontrollplan, müssen wichtige Informationen bezüglich des betrachteten Prozesses festgehalten werden. Mögliche Reaktionspläne für bekannte Probleme sollten ebenfalls aufgefasst werden, um für die Zukunft vorzusorgen. Abschließend ist zu erwähnen, wann der Prozess nach einer zukünftigen Störung wieder als „unter Kontrolle“ eingestuft werden kann. Ist dies bekannt, muss die zukünftige Erfassung von Daten in Kontrollkarten hier dazugelegt werden, um sie mit dem Sollwert der Kontrollgrenzen jederzeit vergleichen zu können. Das zuständige Personal muss über die Veränderungen informiert und gut geschult werden [SSM]. Somit wurde eine Six-Sigma Untersuchung nach der DMAIC-Methode durchgeführt und ein verbesserter und stabiler Prozess wurde hinterlassen.

2.3. Simulation: Die numerische Untersuchung

Die Simulation ist heutzutage ein sehr wichtiges Werkzeug in der numerischen Analyse von Prozessen. Laut Blatt 1 der VDI-Richtlinie 3633, die im Dezember 2014 erschienen ist, ist Simulation das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind [...]“. Diese kurze Definition, fasst die wichtigsten Kernaspekte der Simulation zusammen.

Bei genauerem Betrachten der Definition, lässt es sich entnehmen, dass ein dynamischer Prozess nachgebildet wird. Dabei gibt es bei der Simulation Werkzeuge, womit zum einen das Verhalten eines Prozesses nachgebildet wird und zum anderen das visuelle Erscheinungsbild. Das Nachbilden ist oft nötig, denn somit lassen sich beispielsweise auch schwer zugängliche Prozesse, jederzeit betrachten. Eine Anwendung wäre z.B. die Berechnung der Kettenreaktion in einer Atombombe. Außerdem werden bei einem laufenden, realen, dynamischen Prozess andauernd Kosten erzeugt, welche durch das digitale Nachbilden beseitigt werden. Ferner kann durch das Nachbilden eines Prozesses, das Verhalten des Prozesses von überall aus untersucht werden. So kann also eine Simulation dazu dienen, einen Prozess unerfahrenen Mitarbeitern vorzustellen oder Studierende zu lehren, ohne dabei den Prozess vor Ort und präsent zu haben.

Gleichwohl kommen die Fragen nach der Definition von einem System, Prozess und Modell auf. Nach der oben genannten VDI-Richtlinie, ist ein System eine abgegrenzte Menge, welche Elemente bzw. Komponenten enthält, die miteinander in Beziehung stehen. Ein Prozess ist demnach die Zustandsänderung der Komponenten in einem System. Ein Modell dient dazu ein System vereinfacht nachzubilden. Es gibt viele verschiedene Arten von Modellen. Diese drei Begriffe werden in Abschnitt 2.2.1. genauer vorgestellt.

Aus der obigen Definition geht außerdem hervor, dass die gewonnenen Erkenntnisse wieder auf die Wirklichkeit übertragen werden sollen. Dies ist auch der hauptsächliche Grund, warum Simulationen existieren. Simulationen kommen meistens dann zum Einsatz, wenn ein sehr komplexer Zusammenhang in der Wirklichkeit nur schwer durch analytische Methoden aufzufassen ist. Dieses Problem wird dann durch eine Simulation übersichtlich abgebildet. Die Erkenntnis die dann aus der Simulation gewonnen wird, lässt sich problemlos auf die Realität übertragen, da sie sich sehr ähnlich verhält. Des Weiteren lässt sich durch eine Simulation untersuchen, welche Störfaktoren existieren und wie diese beseitigt werden können. Ferner kann die Simulation dabei helfen, ein besseres Systemverständnis zu erlangen. Die durch eine Simulation erstellten Animationen sorgen für ein besseres Verständnis von komplexen Systemen. Indem die Prozesszeit verlangsamt oder beschleunigt abläuft, werden

Einblicke generiert, die in der Wirklichkeit nicht existieren können. Ferner lassen sich beliebig viele Experimente mit wechselnden oder konstanten Randbedingungen auf der Simulationsebene durchführen. Nach dem Gesetz der großen Zahlen, steigt die Wahrscheinlichkeit des Erwartungswertes, mit wachsender Anzahl an Versuchen immer weiter an. Der Vorteil ist, dass im Gegensatz zu realen Experimenten relativ geringe Kosten anfallen [EST].

Neben vielen Vorteilen, bieten Simulationstechniken auch einige Nachteile. Zum einen ist die Modellbildung des Prozesses eine sehr komplexe Angelegenheit, was mit hohem Aufwand verbunden ist und Mitarbeiter benötigt, die ein großes Prozessverständnis haben. Zum anderen weicht jedes Modell, egal wie sehr es dem tatsächlichen Prozess ähnelt, ein wenig vom realen Prozess ab. Somit ist die Qualität der Ergebnisse in jedem Fall vom Prozessverständnis des Modellierers abhängig. Ferner ist die Analyse der ermittelten Daten ebenfalls komplexer als die Daten einer analytischen Untersuchung, da meistens die Ergebnisse zu einem gewissen Anteil Abweichungen zur Realität aufweisen [EST]. Dadurch muss zunächst die Ursache der Abweichungen geklärt werden.

2.3.1. Systeme, Modelle und deren verschiedene Simulationsarten

In der Simulationstechnik existieren viele verschiedene Arten von Simulationsmöglichkeiten. Deshalb ist es nötig, diese verschiedenen Arten voneinander abzugrenzen.

Zunächst sollten die Begriffe System und Prozess für ein besseres Verständnis geklärt werden. Abbildung 2.10 illustriert den Zusammenhang zwischen einem System und einem Prozess. Dabei wird ein System durch eine Systemgrenze eingeschränkt. Nach [ST70] und dem Blatt 1 der VDI-Richtlinie 3633 ist ein System eine Anhäufung von Komponenten in einer begrenzten Menge. Die Komponenten des Systems stehen in einer gewissen Relation untereinander und beeinflussen sich durch Wechselwirkungen und Abhängigkeiten um ein logisches Ziel zu erfüllen. Der Abbildung 2.10 lässt es sich entnehmen, dass die Zustandsübergänge dieser Komponenten, durch einen Prozess beschrieben werden.

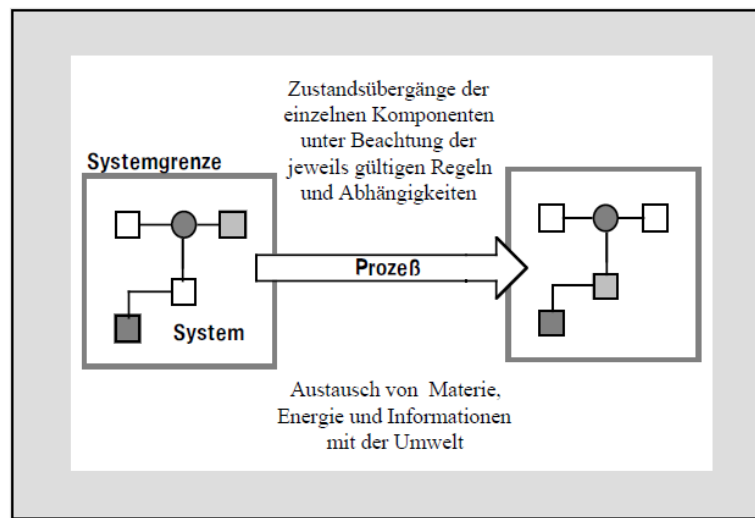


Abbildung 2.10: Der Zusammenhang von einem System und einem Prozess [EST]

Um ein System untersuchen zu können, sollte feststehen ob Experimente mit neuen Parametern an einem bestehenden Prozess durchgeführt werden können, ohne zu hohe Kosten zu verursachen oder dem Prozess bleibende Schäden hinzuzufügen. Ist dies der Fall, so sollten die Versuche am bestehenden Prozess durchgeführt werden, da so der größte Bezug zur Realität gewährleistet ist [LAW15]. Ist dies nicht der Fall, muss ein passendes Modell erstellt werden.

Hier wird unterschieden zwischen physikalischen und mathematischen Modellen. Unter physikalischen Modellen, sind typische Modelle wie z.B. ein Cockpitsimulator für Piloten oder ein Modellauto im Windkanal zu verstehen. Diese sind allerdings für die statistische Untersuchung von Prozessen irrelevant. Deshalb kommen hier die mathematischen Modelle in Frage. Diese bilden ein System mithilfe von Zahlen und Gleichungen ab. Die Zahlen und Gleichungen können dann variiert werden um das Prozessverhalten zu erforschen [LAW15].

Steht es fest, dass ein mathematisches Modell benötigt wird, muss als nächstes überlegt werden, ob das Problem mithilfe eines analytischen Ansatzes gelöst werden kann oder ob eine numerische Simulation unumgänglich ist. Kann das System durch eine einfache Gleichung dargestellt werden, wie z.B. $v = s/t$, wobei v die Geschwindigkeit, s die Strecke und t die Zeit darstellt, dann ist es empfehlenswert das Problem analytisch zu lösen. Bei so einem einfachen Modell kann z.B. die Strecke s verdoppelt und die Zeit t konstant gehalten werden, um nachzuschauen was mit der Geschwindigkeit v passieren muss. Doch ist das System viel komplexer und lässt sich nicht so einfach mithilfe einer Gleichung abbilden, dann wird eine Simulation benötigt [LAW15]. Dieser Zusammenhang wird in der Abbildung 2.11 nochmal übersichtlich dargestellt.

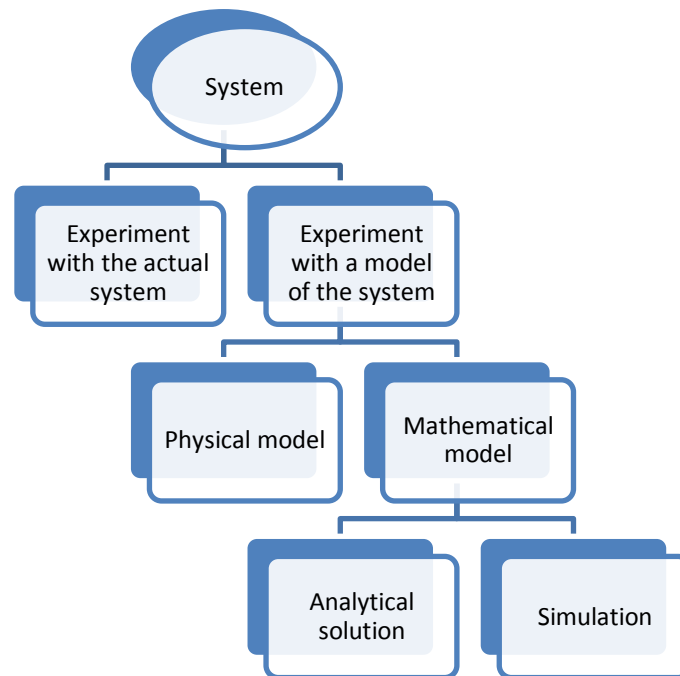


Abbildung 2.11: Darstellung eines Systems als Simulation nach [LAW15]

Ist es sichergestellt, dass ein mathematisches Modell vorliegt welches mithilfe von einer Simulation gelöst werden soll, muss als nächstes geklärt werden, welche Art von Simulation für diese Aufgabe die passende ist. In der Abbildung 2.12 aus [EA06] wird eine Untergliederung der Simulation dargestellt.

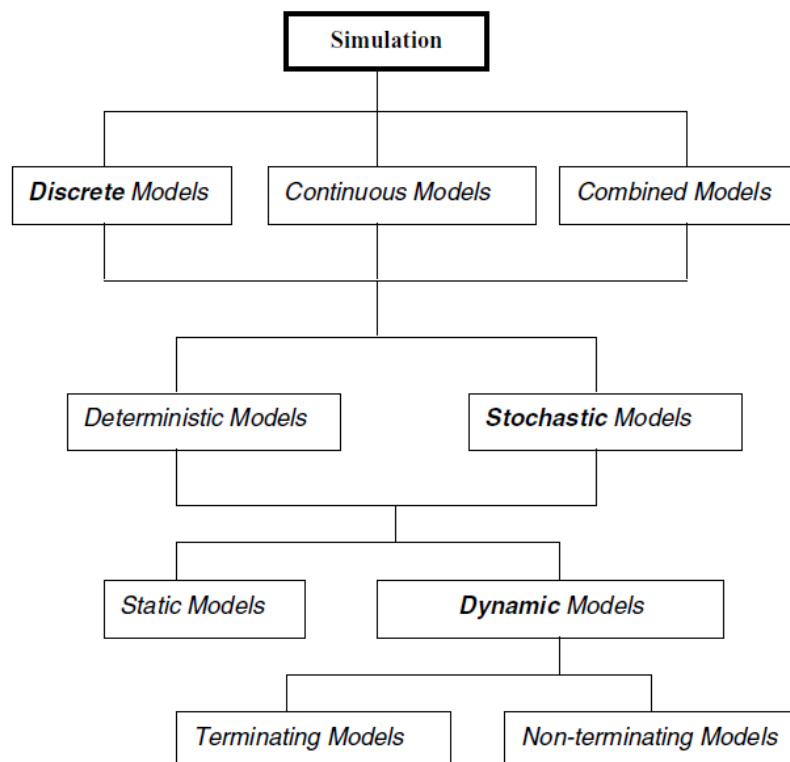


Abbildung 2.12: Die Ebenen der Simulation aus [EA06]

Zunächst wird zwischen kontinuierlichen, diskreten und kombinierten Modellen unterschieden. Dabei gilt: bei kontinuierlichen Modellen, ändert sich der Systemzustand in einem bestimmten Zeitintervall unendlich oft. Dabei verläuft die Zeit in infinitesimal kleinen Schritten, in denen sich der Zustand des Systems ebenfalls ändert [EST]. Kontinuierliche Simulationen bauen meistens auf Differentialgleichungen auf. Falls diese Differentialgleichungen einfach sind, können diese auch analytisch gelöst werden. Ansonsten müssen sie numerisch gelöst werden. Dabei sind meist Initialwerte beim Startzeitpunkt $t=0s$ angegeben. Diese werden Anfangsbedingungen genannt [LAW15]. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 2.13 dargestellt und wird in Abschnitt 2.2.2. näher behandelt.

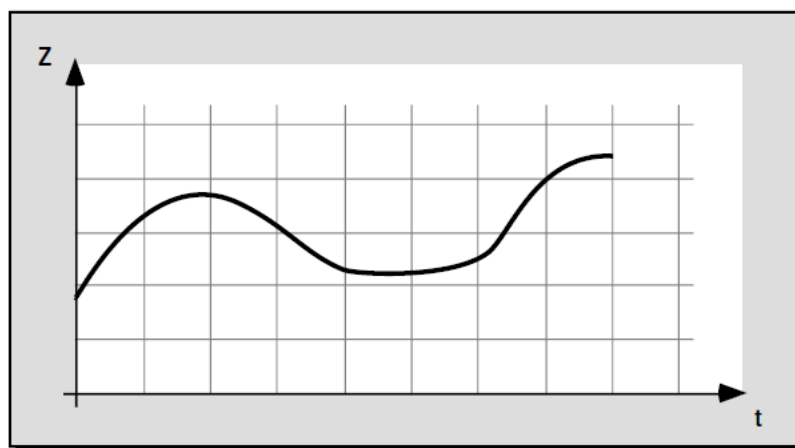


Abbildung 2.13: Prozessverhalten eines kontinuierlichen Modells [EST]

Diskrete Modelle werden in zeit- und ereignisdiskrete Modelle unterteilt. In einem zeitdiskreten Modell, ändert sich die Zeit in endlich großen Intervallen Δt mit konstanter Länge. Dabei kann sich der Systemzustand lediglich innerhalb dieser Intervalle verändern, was der Abbildung 2.14 entnommen werden kann [EST].

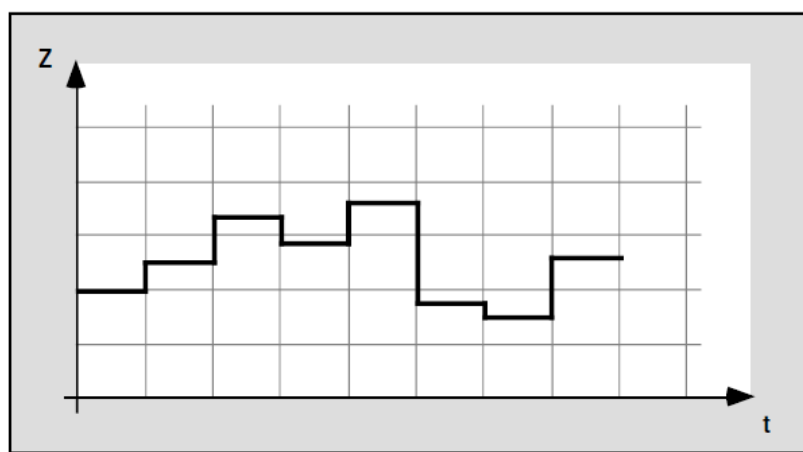


Abbildung 2.14: Prozessverhalten eines zeitdiskreten Modells [EST]

Die in der Praxis allerdings am häufigsten eingesetzte Variante ist die ereignisdiskrete Simulation. Der Systemzustand kann sich zwar zu jedem Zeitpunkt beliebig oft

ändern, dies ist allerdings wiederum nur in einem Zeitintervall Δt möglich [EST]. Das bedeutet also, dass die Intervallgröße von dem Abstand der Ereignisse abhängt. Die Abbildung 2.15 zeigt das Prozessverhalten bei einem fiktiven und ereignisdiskreten Modell. Ereignisdiskrete Simulationen werden in Abschnitt 2.2.3. näher diskutiert.

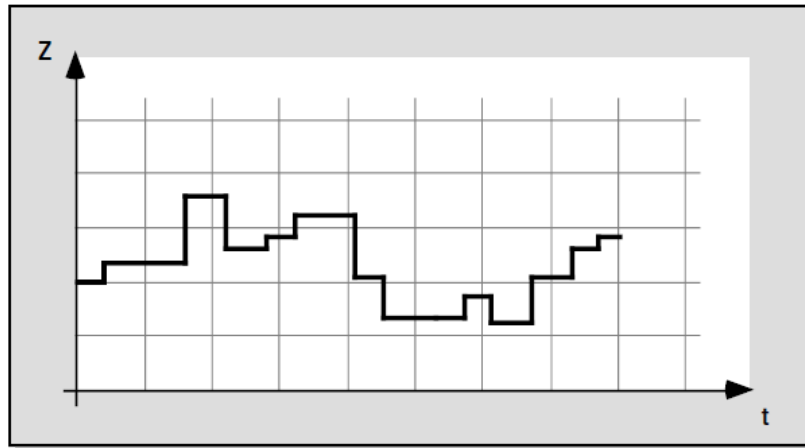


Abbildung 2.15: Prozessverhalten eines ereignisdiskreten Modells [EST]

Des Weiteren werden deterministische Modelle von stochastischen Modellen abgegrenzt. Sind alle Input-Variablen eines sehr komplizierten Prozesses – dessen Verhalten durch eine komplizierte Gleichung illustriert werden kann – bekannt, so ist das Ergebnis deterministisch und es kann jedes Mal die gleiche Lösung berechnet werden. Solche Modelle sind allerdings eher selten, da zumindest eine Komponente eine Zufallsvariable in sich birgt. In diesen Fällen wird von einem stochastischen Modell gesprochen, da sich die Ergebnisse immer ein wenig voneinander unterscheiden und somit ein Ergebnis lediglich als Näherung gesehen werden kann [LAW15].

Letztlich muss unterscheiden werden, ob es sich um ein statisches oder dynamisches Simulationsmodell handelt. Bei einem statischen Modell, wird genau ein einziger Zeitpunkt betrachtet, währenddessen bei dem dynamischen Modell die Zeit voranschreitet. Die wohl bekanntesten statischen Simulationen basieren auf Monte-Carlo-Modellen, welche in Abschnitt 2.2.4. genauer vorgestellt werden. Ein klassisches zeitlich variables Modell wiederum beschreibt z.B. eine Simulation von einem Fließband eines Unternehmens [LAW15].

2.3.2. Kontinuierliche Simulation

Wie bereits erwähnt wurde, ändert sich der Systemzustand in einem kontinuierlichen Modell in infinitesimal kleinen Schritten unendlich oft. Solche Modelle werden meist bei der Simulierung von Schwingungen und Strömungen eingesetzt [EST]. Weitere Beispiele für kontinuierliche Systeme sind z.B.: die zurückgelegte Strecke eines fliegenden Flugzeugs oder der Füllstand eines Staudamms. Ferner können nach

[FSDVKHAM15] auch Überflutungsrisiken berechnet werden. Das Schwingverhalten des in der Abbildung 2.16 dargestellten Feder-Masse-Dämpfer Systems, kann mithilfe solch einer kontinuierlichen Simulation untersucht werden.

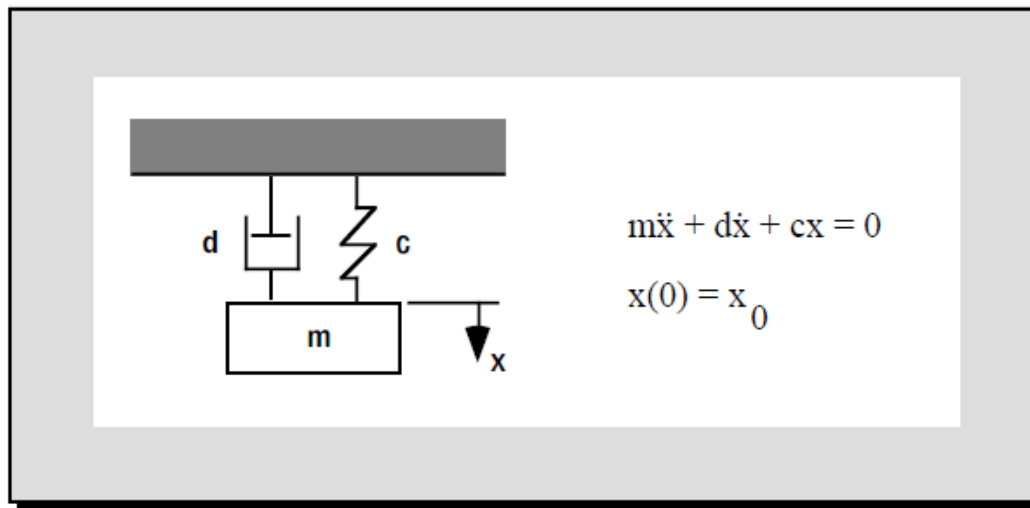


Abbildung 2.16: Feder-Masse-Dämpfer-System mit Differentialgleichung und Randbedingung [EST]

Zur Beschreibung von kontinuierlichen Simulationsmodellen, werden meistens Differentialgleichungen eingesetzt. Einfache Probleme wie das in der Abbildung 2.16 dargestellte Feder-Masse-Dämpfer-System lassen sich mithilfe von Differentialgleichungen gut behandeln. Bei komplexen Systemen werden auch die Differentialgleichungen zu schwierig und lassen sich somit nicht mehr so einfach lösen. Zur Lösung der Differentialgleichungen werden lediglich noch Anfangs- bzw. Randbedingungen benötigt. Bei deterministischen Systemen sind dies oft die einzigen Zusammenhänge zur Beschreibung des Systems. Bei stochastischen Systemen dagegen, kommen noch stochastische Störfaktoren hinzu, die mithilfe einer Differentialgleichung nicht aufgefasst werden kann, wodurch diese Simulationsvariante nicht mehr brauchbar wird. [EST]

2.3.3. Ereignisdiskrete Simulation

Ereignisdiskrete Simulationen sind diejenigen, in denen die Zeit voranschreitet und sich die Zustandsgrößen bei einer beliebig vorkommenden Begebenheit verändern. Diese Begebenheiten sind Ereignisse, die die Zustandsgrößen verändern können. [LAW15] Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten, wie das Voranschreiten der Zeit modelliert werden kann. In beiden Fällen beginnt die Zeit beim Initialisieren des Anfangswertes t_0 .

In der ersten Variante können die Zeitsprünge eine unterschiedliche Länge haben. Jedoch wird von einem Ereignis zum nächsten gesprungen. Beim Ereignis angekommen, wird dieses ausgelöst, die Ergebnisse des Ereignisses werden auf das System übertragen und die Zustandsgrößen verändern sich. Wird dabei eine vorher

festgelegte Abbruchbedingung erfüllt, so wird die Simulation beendet. Falls nicht, wird zum nächsten Ereignis gesprungen [EST]. Die Abbildung 2.17 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

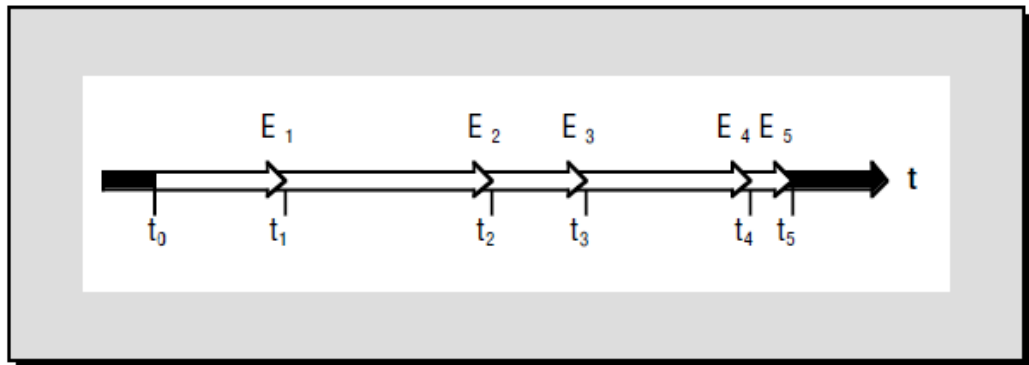


Abbildung 2.17: Modellierung der Zeit mit Sprung zum nächsten Ereignis [EST]

Alle Simulationen, die auf diesem ereignisbasierten Zeitablaufsmechanismus aufbauen, haben unter anderem die folgenden Glieder gemeinsam: Ein Hauptprogramm, welches die gesamten Unterprogramme koordiniert; einen Systemstatus, wo der Zustand der Zustandsvariablen aufgefasst wird; die Simulationsuhr, um den aktuellen Stand der Uhr, seit Anfang der Simulation nachzuvollziehen; eine Ereignisliste, wo der Zeitpunkt des nächsten Ereignisses gespeichert ist; Initialisierungsroutine, um das System zu Initialisieren; eine Timing Routine, welche das nächste Ereignis aus der Ereignisliste raussucht und die Simulationsuhr auf dieses Ereignis stellt und eine Ereignis Routine, welche die Zustandsvariablen nach dem Ereignis aktualisiert [LAW15].

Am häufigsten werden solche Modelle zur Simulation von Warteschlangensystemen eingesetzt. Dabei wird lediglich ein Schalter betrachtet. Es soll z.B. die Wartezeit in der Warteschlange eines Kunden bei der Bank, durch solch eine Simulation berechnet werden. Dafür werden drei Zustandsvariablen benötigt: als erstes wird mithilfe einer Zustandsvariable, der Status des Schalters definiert. Der Status wird benötigt um bei der Ankunft eines Kunden zu entscheiden, ob dieser sofort bedient werden kann oder ob er sich an die Warteschlange anstellen muss. Dieser kann entweder belegt oder frei sein. Als nächstes wird die Anzahl der Kunden, die in der Warteschlange warten mithilfe einer Zustandsvariable aufgefasst. Dies ist nötig, da nachdem ein Kunde erfolgreich bedient wurde entschieden werden muss, ob der Schalter seinen Status auf frei oder belegt setzen muss. Letztlich wird noch die Ankunftszeit des Kunden bei der Warteschlange benötigt, um die konkrete Wartezeit von seiner Ankunft an der Warteschlange bis zu seiner Bedienung am Schalter zu berechnen. In diesem System existieren zwei Arten von Ereignissen: zum einen ist es die Ankunft eines neuen Kunden an der Warteschlange und zum anderen das Ende der Bedienung eines Kunden am Schalter, was zur Folge hat, dass der Schalter für den nächsten Kunden

wieder zugänglich gemacht wird. Das Ankommen eines neuen Kunden ist ein Ereignis, da dadurch entweder die Zustandsgröße vom Status des Schalters von frei auf belegt verändert oder die Zustandsgröße der in der Schlange wartenden Kunden um eins erhöht wird. Gleichmaßen ist das Ende der Bedienung eines Kunden ein Ereignis, da es die Zustandsgröße vom Status des Schalters von belegt auf frei verändert oder die Anzahl der Kunden in der Warteschlange um eins reduziert [LAW15].

Bei der zweiten Variante wie das Voranschreiten der Zeit modelliert werden kann, haben alle Zeitsprünge die gleiche Länge Δt . Sie sind also äquidistant. Dabei ist es nicht entscheidend wie viele Ereignisse in diesem Zeitfenster liegen. Falls also die Abbruchbedingung nicht erfüllt wird, entweder durch fehlende Ereignisse oder Ereignisse, die die Abbruchbedingung nicht erfüllen konnten, geht die Simulation um Δt weiter [EST]. Unter Umständen wird für diese Art der Zeitmodellierung mehr Rechendauer benötigt, da die Zeit die inaktiven Phasen des Modells nicht überspringt [LAW15]. In Abbildung 2.18 wird das Modell der Zeit mit konstanten Zeitschritten illustriert.

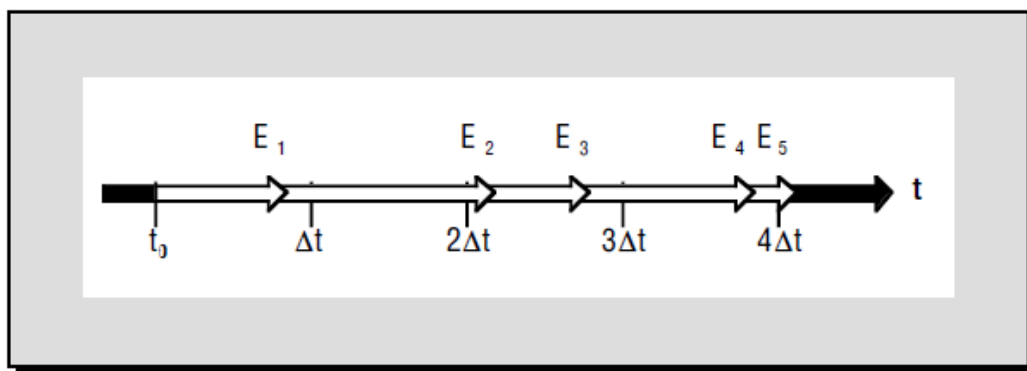


Abbildung 2.18: Modellierung der Zeit mit konstanten Zeitschritten Δt [EST]

Ereignisdiskrete Modelle kommen z.B. bei der Simulation von Fertigungseinrichtungen und Warteschlangen zum Einsatz [EST]. Deshalb sind ereignisdiskrete Modelle für diese Arbeit von entscheidender Bedeutung. Die ereignisdiskrete Simulation und kontinuierliche Simulation haben beide gemeinsam, dass sie eine endliche Anzahl an Zeitschritten beinhalten. Der Unterschied ist, dass sich bei der ereignisdiskreten Simulation die Zustandsvariablen nach einem Ereignis verändern und bei der kontinuierlichen Simulation aufgrund der Differentialgleichung [LAW15]. Weitere Einsatzorte sind nach [BCNN10] die Logistik, das Gesundheitswesen oder beispielsweise in der Landwirtschaft und nach [SH05] das türkische Militär, zur Optimierung der Kraftstoffzuführungssysteme im Sinne von Pipelines, Seetankern usw.

2.3.4. Monte-Carlo-Simulation

Monte-Carlo-Simulationen entstanden während des zweiten Weltkriegs zur Untersuchung von Atombomben und dem Verhalten der Atome während der Kettenreaktion [Schlundt13]. Die erste Anwendung der Monte-Carlo-Simulation geht zurück ins Jahr 1946, als Stan Ulam herausfinden wollte wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass er im Solitär mit 52 Karten gewinnt. Dabei bemerkte er wie aufwändig es ist, alle möglichen Kombinationen durchzugehen. Er brach diesen Versuch ab und spielte stattdessen 100 zufällige Möglichkeiten des Spiels durch. Zum Schluss dividierte er die Anzahl der gewonnenen Spiele durch 100 und er bemerkte, dass er eine gute Näherung für ein sehr komplexes Verfahren gefunden hatte. [Schlundt13] Monte-Carlo-Simulationen können sowohl stochastische als auch deterministische Probleme lösen. Eine Monte-Carlo-Simulation basiert auf der Theorie der großen Zahlen [Nahr15]. Dies bedeutet beispielsweise, dass bei einem einfachen Münzwurf die Wahrscheinlichkeit beider Seiten $\frac{1}{2}$ beträgt, obwohl dies kein aufgeschriebenes Gesetz ist [Nahr15]. Dabei ist nicht jedes Verfahren was einen Prozess sehr oft simuliert eine Monte-Carlo-Simulation. Das entscheidende dabei ist, dass bei vielen Versuchen auch viele Zufallszahlen generiert werden [LAW15].

Eine Simulation liegt beispielsweise vor, wenn mithilfe eines Zufallsgenerators der einfache Wurf einer Münze, mithilfe einer Zufallszahl die zwischen $(0,1]$ verteilt ist abgebildet wird. Dabei steht Kopf beispielsweise für die 0 und Zahl für die 1. Dieses Beispiel ist also eine Simulation, jedoch noch keine Monte-Carlo-Simulation [Schlundt13].

Eine Monte-Carlo-Methode liegt vor, wenn beispielsweise eine eingegrenzte Figur in einem Quadrat mit Dartpfeilen abgeworfen und anschließend das Verhältnis von in der Figur liegenden Pfeilen zu den insgesamt geworfenen Pfeilen berechnet wird. Dies ist also eine Monte-Carlo-Methode, aber auch noch keine Monte-Carlo-Simulation [Schlundt13].

Eine Monte-Carlo-Simulation würde vorliegen, wenn eine sehr große Anzahl an Zufallszahlen die zwischen $(0,1]$ liegen generiert werden und dabei die Werte $\leq 0,5$ z.B. bei einem Münzwurf für Kopf und die Werte $>0,5$ für Zahl stehen würden. Dies wäre eine Monte-Carlo-Simulation für eine mehrmals geworfene Münze [Schlundt13].

Dabei haben Monte-Carlo-Simulationen meistens die gleiche Vorgehensweise: Dafür werden zunächst die statistischen Eigenschaften der Input-Variablen benötigt. Anschließend werden auf Basis dieser statistischen Eigenschaft viele Zufallszahlen generiert. Danach werden deterministische Berechnungen mit diesen Zufallszahlen durchgeführt. Diese Zufallszahlen verhalten sich mit Hinblick auf die Streuung und Varianz, ähnlich wie die ursprünglichen Daten. Somit ist es im nächsten Schritt möglich, statistische Untersuchungen anhand von diesen Daten durchzuführen. Dabei

beschreibt die Gleichung 2.3 die Abweichung der Werte vom ursprünglichen Mittelwert der Input-Variablen [Paltani11].

$$\frac{1}{\overline{N}} \quad (2.3)$$

Dieser Gleichung 2.3 lässt es sich entnehmen, dass mit steigender Anzahl der Wiederholungen, die Abweichung immer geringer wird [Paltani11]. Im Folgenden wird ein Beispiel aus [Schlundt13] für die Berechnung der Kreiszahl π mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation, zur Verdeutlichung der typischen Vorgehensweise vorgestellt. Im ersten Schritt werden die Input-Variablen in ihrer Eingabegröße eingeschränkt. Dafür wird in der Abbildung 2.19, in einem Quadrat mit den Kantenlängen 1 ein Viertelkreis eingezeichnet.

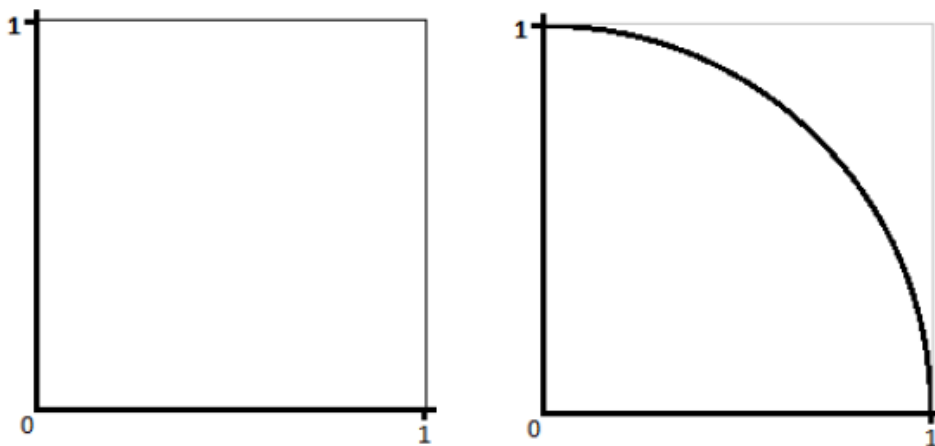


Abbildung 2.19: Eingrenzen der Input-Variablen aus [Schlundt13]

Im nächsten Schritt werden dann im Sinne der Generierung von Zufallszahlen, viele Punkte in dieses Quadrat eingezeichnet. Es werden also sowohl für die x-Koordinate, als auch für die y-Koordinate Zufallszahlen generiert, die somit eingezeichnet werden können. Diesen Zusammenhang, stellt Abbildung 2.20 dar.

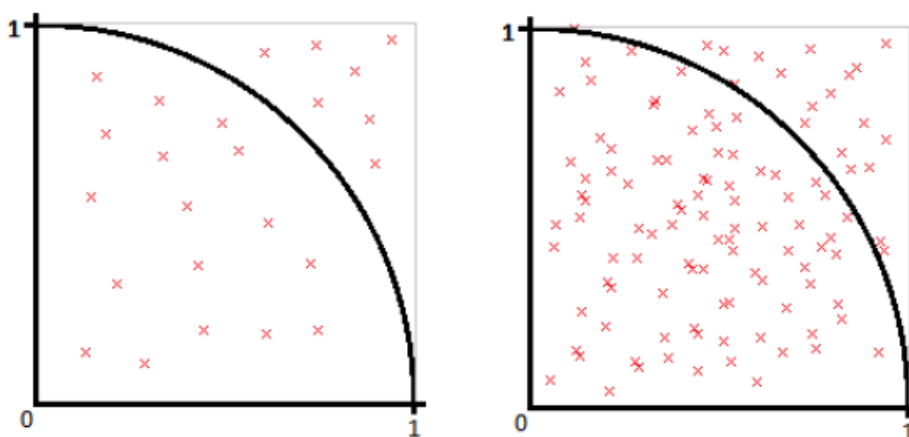


Abbildung 2.20: Generierung von Zufallszahlen aus [Schlundt13]

Danach werden dann für die deterministische Berechnung alle Punkte, die innerhalb des Viertelkreises sind gezählt und in ein Verhältnis zur Gesamtanzahl der Punkte gesetzt. Die Berechnung erfolgt anhand der Gleichung 2.4.

$$\frac{\text{Innerhalb des Viertelkreises}}{\text{Gesamtanzahl}} = \frac{\pi}{4} \quad (2.4)$$

Im letzten Schritt wird dann im Sinne der Auswertung, das Ergebnis mit dem Faktor 4 multipliziert, um die exakte Kreiszahl π zu erhalten. In Abbildung 2.21 ist es ersichtlich, dass mit steigender Anzahl an Wiederholungen, die Kreiszahl π genauer berechnet wird.

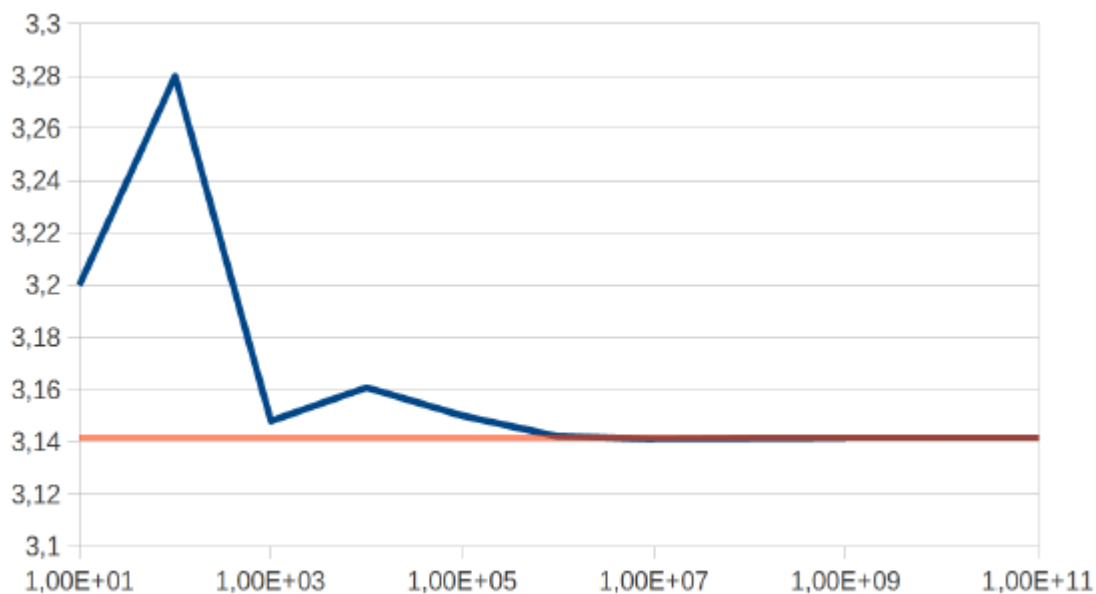


Abbildung 2.21: Annäherung an die Kreiszahl aus [Schlundt13]

Dabei beginnt der erste Punkt im Diagramm mit 10 Punkten, die in die Konstruktion aus Abbildung 2.19 eingezeichnet werden und endet bei 100 Milliarden Punkten. Dadurch gelingt es in [Schlundt13], die Kreiszahl auf vier Nachkommastellen genau zu berechnen. Er kriegt als Ergebnis dieser Monte-Carlo-Simulation den Wert: 3,14158731.

Neben der Simulation von Produktionsprozessen, kommen Monte-Carlo-Simulationen auch in vielen anderen Gebieten zum Einsatz. Beispielsweise lassen sich unlösbare Integrale mithilfe der Monte-Carlo-Simulation lösen. Ferner werden Wetter- und Klima-Modelle mithilfe von Monte-Carlo-Methoden erstellt. Andere Gebiete wo Monte-Carlo-Simulationen eingesetzt werden, ist die Nuklearphysik, die Physik, die Chemie und viele andere Wissenschaftsgebiete [Nahr15]. Beispielsweise können nach [RFSRESTM16], poröse Schaumstrukturen zur Neutronendetektion oder die Materialermüdung von A7N01S-T4 Aluminum nach [BXZGTB16] mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation untersucht werden.

2.4. Vorhandene Verknüpfungsansätze

Nachdem die Six Sigma Untersuchung und statistische Prozesssimulation in ihren Facetten ausgiebig vorgestellt wurden, ist es an dieser Stelle sinnvoll vorzustellen, wie aus beiden Methoden das Beste kombiniert werden kann, um so maximalen Profit zu erhalten. Der Gedanke hierbei ist es, die Schwächen der beiden Verfahren zu beheben und von den Erleichterungen des jeweils anderen Verfahrens zu profitieren.

In dem Beitrag zum Tagungsband aus der Winter Simulation Conference vom Jahre 2005, haben Ferrin et al. die wichtigsten Erkenntnisse veröffentlicht. Sie geben Anhaltspunkte, in welchen der DMAIC-Phasen die Simulation integrierbar ist.

Beispielsweise geht es in der Measure Phase los: Laut Ferrin et al. kann hier die Simulation Six Sigma „unter die Arme greifen“, indem die Prozessfähigkeit mithilfe einer Simulation ermittelt wird. Des Weiteren sei es mithilfe von Simulationen möglich, Critical to Quality Kriterien zu ermitteln. Ferner biete die Simulation für die Messsystemanalyse auch fortgeschrittene Werkzeuge.

Für die Analyze Phase biete sich die Simulation vor allem dann an, wenn die Prozessfähigkeit eines Soll-Zustands untersucht werden soll. Hier wäre die Simulation sogar die einzige Methode, die den strengen Regeln von Six Sigma gerechtfertigt sei. In der Improve Phase wird erneut behauptet, dass die Simulation die einzige Methode ist, welche mit der Six Sigma Genauigkeit arbeitet.

Ferner sei es in der Control Phase möglich mit Werkzeugen zu arbeiten, aus denen ähnliche Informationen wie aus einer Kontrollkarte entnommen werden können. So sei es beispielsweise mithilfe von Simulationen möglich, Erkenntnisse zu generieren, ob ein Prozess unter Kontrolle ist oder nicht und wie viele defekte Teile außerhalb der oberen und unteren Kontrollgrenze liegen [FMM05].

Zusätzlich wird unterstrichen, dass mithilfe von Simulationen, vielversprechende Lösungsansätze vor dem kostspieligen Umsetzen am Computer untersucht werden können. Somit würden zum einen die Kosten gespart werden und es würde nicht zu einem Vertrauensbruch zwischen dem Arbeiter und dem Arbeitgeber kommen. Außerdem könne sich so das Team anschließend bei der Umsetzung auf die besten Lösungsansätze konzentrieren [FMM05].

In dem von Uriarte et al. veröffentlichten Beitrag zum Tagungsband „Lean, Simulation and Optimization: A win-win combination“ von der Winter Simulation Conference aus dem Jahre 2015, werden ebenfalls die Vorteile einer Verknüpfung von Simulation und Lean Six-Sigma dargestellt. Dabei wird unterschieden, ob die Simulation als Hilfswerkzeug für Lean Six-Sigma benutzt wird oder ob Methoden aus dem Lean Bereich die Simulation unterstützen sollen.

Zunächst wird die Simulation als Unterstützer der Lean Produktion vorgestellt. Dabei geht hervor, dass Lean lediglich auf die Identifizierung und Ausschussreduktion fokussiert ist. Daher würden Abweichungen in den Einzelteilen gar nicht betrachtet und genau an dieser Stelle käme die Simulation „ins Spiel“, da Simulation die Randomisierung von Variablen beherrscht.

Des Weiteren sei es mithilfe von Simulationen möglich, den Versuchscharakter von Lean Methoden zu unterstützen. Dabei ist der Vorteil der Simulationen, dass gegenseitige Effekte von verschiedenen Einflussfaktoren untersucht werden können. Ferner kann mithilfe der Simulation vor der Implementierung einer Systemverbesserung betrachtet werden, welcher Nutzen daraus gezogen wird. Somit können mögliche Fehler bei der Implementierung und dadurch die Entstehung von Kosten vermieden werden, noch bevor sie überhaupt entstehen.

Bei sehr komplexen Systemen mit vielen Einflussfaktoren oder vielen verschiedenen Bedienern zum Beispiel, hilft die Simulation dabei den Prozess systematisch zu betrachten und somit die Schwachstellen des Systems zu ermitteln [UMNO15].

Neben der Tatsache, dass Simulation die „Schwächen“ von Lean Six-Sigma beseitigt, kann die Simulation auch vorhandene Lean Six-Sigma Techniken unterstützen.

- Beispielsweise können Simulationstechniken dabei verwendet werden, um Lean Methoden zu unterrichten [Robinson et al. 2012].
- Die Simulation kann auch zur Erleichterung von Lean Methoden verwendet werden. Beispielsweise können mithilfe von Simulationen dynamische Prozessdiagramme erstellt werden, wodurch das Systemverständnis gefördert wird.
- Des Weiteren kann die Simulation bei der Prozessbeurteilung verwendet werden. Dabei spielt es keine Rolle, ob es bei einem bestehenden Prozess angewendet wird oder bei einem fiktiven Prozess. Wie bereits erwähnt, kann die Simulation auch vor der Implementierung einer Verbesserung eines bestehenden Prozesses überprüfen, welcher Nutzen aus der Implementierung zu erwarten ist.

Diese Zusammenhänge sind in der folgenden Abbildung 2.22 noch einmal übersichtlich dargestellt.

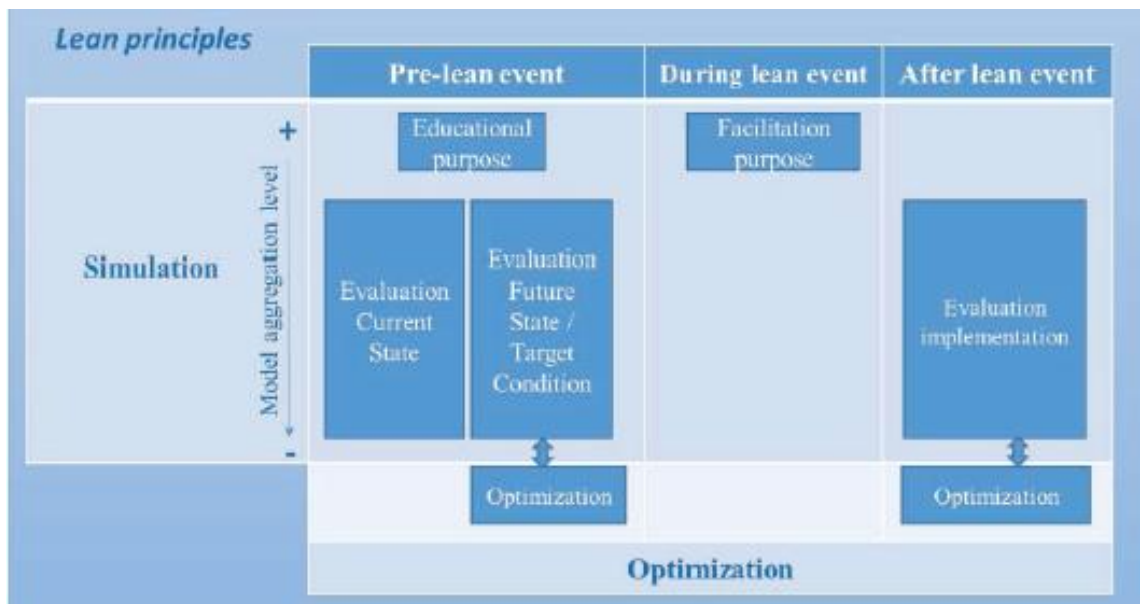


Abbildung 2.22: Integration von Simulation in Lean Six-Sigma [UMNO15]

Wie bereits aus der Überschrift des Beitrags erkennbar ist, handelt es sich bei der Verknüpfung von Simulation und Lean Six-Sigma, um eine „win-win Situation“. Dementsprechend besteht die Möglichkeit, dass Lean Methoden Simulationen unterstützen können. Dabei kann es einige Arbeitsschritte sparen, wenn in dem Simulationsteam ein Teammitglied aus dem Lean bzw. Six Sigma Umfeld kommen würde. Dieser würde das Simulationsteam bei der Zieldefinierung und Projektlenkung unterstützen. Er würde die Versuche auf bestimmte, statistisch sinnvolle Fälle begrenzen und so könnte viel Aufwand gespart werden. Das Problem in der Realität allerdings ist es, dass diese beiden Bereiche nur selten in einem Unternehmen aufeinander treffen. Ist dies allerdings der Fall, dann herrscht meistens eine dürftige Kommunikation zwischen diesen beiden Bereichen [UMNO15]. Somit ist der Aspekt der Teamarbeit ein wichtiger Punkt, der bei einem Simulationsprozess durchaus beachtet werden sollte.

Die sogenannte „Stakeholder Analyse“ aus der Lean Six Sigma garantiert, dass in jedem Fall die Untersuchungen Ergebnisse liefern, welche die Interessen des Auftraggebers decken. Somit wäre die Gefahr beseitigt, dass ein Simulationsmodell nach den Interessen des Modellierers aufgebaut ist und im Endeffekt der Auftraggeber nicht zufrieden ist. In der nachfolgenden Abbildung 2.23 wird dargestellt, in welchem Stadium, Lean die Simulation und andersrum unterstützen könnte.

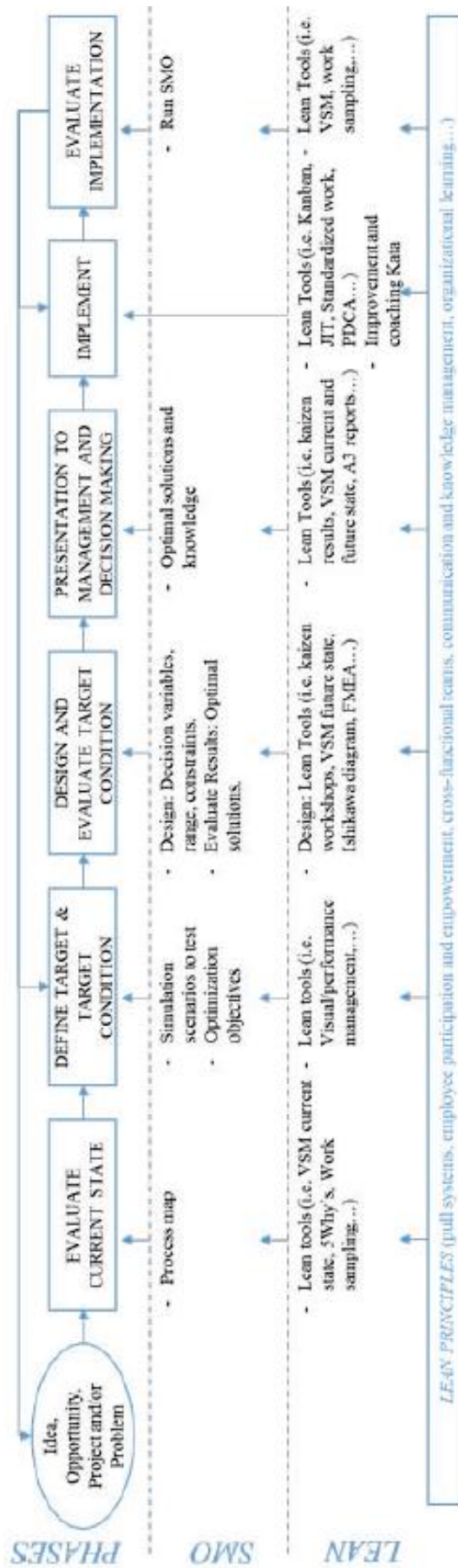


Abbildung 2.23: Ansatzpunkte für die gegenseitige Unterstützung von Lean und Simulation [UMNO15]

In dem von El-Haik und Al-Aomar im Jahre 2006 veröffentlichtem Buch „Simulation-Based Lean Six-Sigma and Design for Six-Sigma“ werden ebenfalls Möglichkeiten untersucht, wie Simulationstechniken in den DMAIC- und DFSS-Zyklus integriert werden können. Dabei ist für diese Arbeit lediglich die Integration von Simulationstechniken in den DMAIC-Zyklus entscheidend. In dem Buch wird zunächst ausgiebig die Six Sigma Methode und danach die Simulation generell beschrieben. Anschließend gehen die Autoren auf Verknüpfungsmöglichkeiten ein. Allgemein könne Simulation dazu genutzt werden, um ein System adäquat abzubilden, die Prozessleistung bzw. -fähigkeit zu ermitteln, sogenannte „what-if“ Untersuchungen durchzuführen uvm. [EA06]. In der nachfolgenden Abbildung 2.24 wird dargestellt, wie sich El-Haik und Al-Aomar eine Integration von Simulation in den DMAIC-Zyklus vorstellen. Dabei sind auf der linken Seite der Abbildung die einzelnen Phasen des DMAIC-Zyklus dargestellt und in der Mitte der Abbildung sind die Interaktionen zur sogenannten „Discrete Event Simulation“ abgebildet.

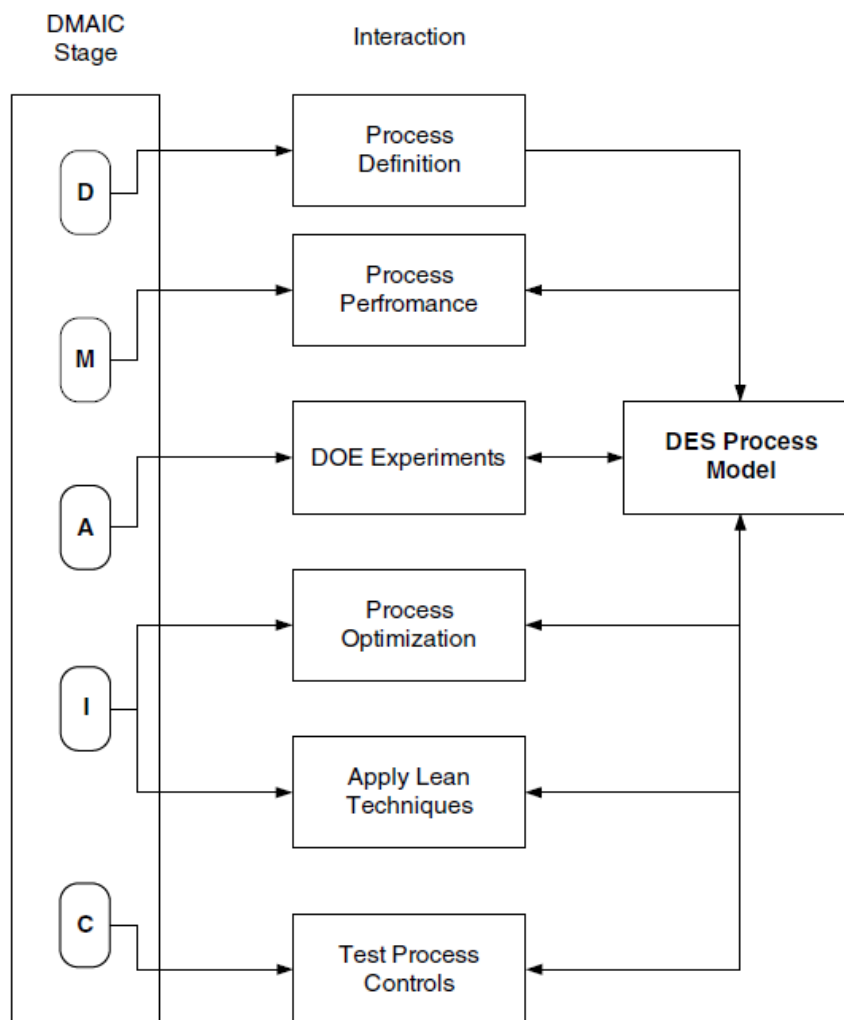


Abbildung 2.24: Integration von Simulation in den DMAIC-Zyklus [EA06]

Demnach dient die Simulation in der Define Phase dazu, den Prozess mit Hinblick auf Struktur, Logik und Parametern besser zu definieren. Zudem biete Simulation den Vorteil, dass CTQs direkt in das Modell mitprogrammiert werden können.

In der Measure Phase sei es dann möglich, die Prozessfähigkeit abzuschätzen, indem die CTQs mithilfe der Simulation gemessen werden. Oft sei eine Simulation die einzige Möglichkeit überhaupt, Messwerte für die CTQs zu ermitteln.

In der Analyze Phase würde die Simulation das „Rückgrat“ der statistischen Untersuchungen bilden. Da physikalische Modelle von realen Prozessen sehr teuer seien, falls sie überhaupt erstellt werden können, sei die Simulation durch ihre Flexibilität ein unverzichtbares Element von statistischen Analysen. Durch die Möglichkeit Zufallszahlen zu erzeugen und die Fähigkeit Prozesse gut zu animieren, biete die Simulation eine gute Umgebung für statistische Untersuchungen.

In der Improve Phase sei dadurch die Implementierung der Ergebnisse aus der vorherigen Phase umso leichter. Somit könnten optimale Prozessparameter in diesem Stadium der Untersuchungen ermittelt werden.

Abschließend könnten in der Control Phase, Kontrollpläne und Einsatzmöglichkeiten vorerst anhand der Simulation getestet werden, um letzte Schwierigkeiten zu beseitigen. Dadurch ist es möglich Kosten die aufgrund von Fehlern bei der Implementierung in den realen Prozess entstehen würden, entweder ganz zu beseitigen oder zumindest zu verringern [EA06].

Der so veränderte Prozess sollte dann wie in der nachfolgend dargestellten Abbildung 2.25 verlaufen. In der Abbildung ist eine Art „Fahrplan“ nach den Vorstellungen der Autoren El-Haik und Al-Aomar dargestellt. Außerdem wurden auch Methoden der Lean Produktion in diese Betrachtung aufgenommen. Wie der Abbildung entnommen werden kann, wurde jede Phase in drei Schritte aufgeteilt.

In der Define Phase besteht die Aufgabe darin die CTQs so zu operationalisieren, dass sie zwar noch dasselbe Bedürfnis zum Ausdrücken bringen, aber nun eine messbare Größe bilden. Dies ist entscheidend um die CTQs in eine DES aufnehmen zu können. Auf diese Weise können diese Informationen außerdem an wichtige Prozessinformationen wie z.B. Puffergröße, Lagerort und Messwerte etc. gekoppelt werden. [EA06]

In der Measure Phase besteht nun der Fokus darin, die sogenannte Wertstromanalyse aus dem Lean Umfeld in die Simulation einzubringen. Laut [SSBB16] ist die „Wertstromanalyse [...] eine Methode, um den Ist-Zustand eines Prozesses übersichtlich darzustellen.“ Es enthält wichtige Informationen wie z.B. Zyklus- und Taktzeiten, Inventarlisten uvm. Anhand dieser Wertstromanalyse kann danach das diskrete Simulationsmodell erstellt werden, um den statistischen Charakter eines

Prozesses abzubilden. Das einzigartige an diesem „Fahrplan“ sei nun, dass die bereits vorhandene statische Wertstromanalyse mithilfe des diskreten Simulationsmodells und den daraus ermittelten statistischen Werten, in eine dynamische Wertstromanalyse umgewandelt werden kann. Dadurch sei es möglich einen Prozess viel übersichtlicher und viel realistischer aufzufassen. Falls diese statistische Basis nun erstellt ist, so wäre es die Grundlage der Untersuchungen in der folgenden Analyze Phase. [EA06]

Die Analyze Phase wiederum nutzt die Vorteile der Six Sigma Methode, um mithilfe eines DOE (Design of Experiments) optimale Prozessparameter zu finden. Hier wird dieser Vorgang durch die Simulation unterstützt, indem Versuchsabläufe simuliert werden. Dabei kann an der Simulationsuhr beliebig gedreht werden. [EA06]

Die anschließende Improve Phase dient schließlich der Implementierung von Lean Techniken, um den Prozess mit Hinblick auf Kosten und Prozesszeit zu verbessern. Dabei dient die Simulation erneut als Testumfeld. Als Ergebnis der Improve Phase sollte eine neue Wertstromanalyse erstellt und die CTQs angepasst werden. Zum Schluss wird noch das Modell so angepasst, dass es den zukünftigen Stand des Prozesses simuliert. [EA06] Letzlich wird in der Control Phase eine Art Kontrollplan erstellt und implementiert [EA06].

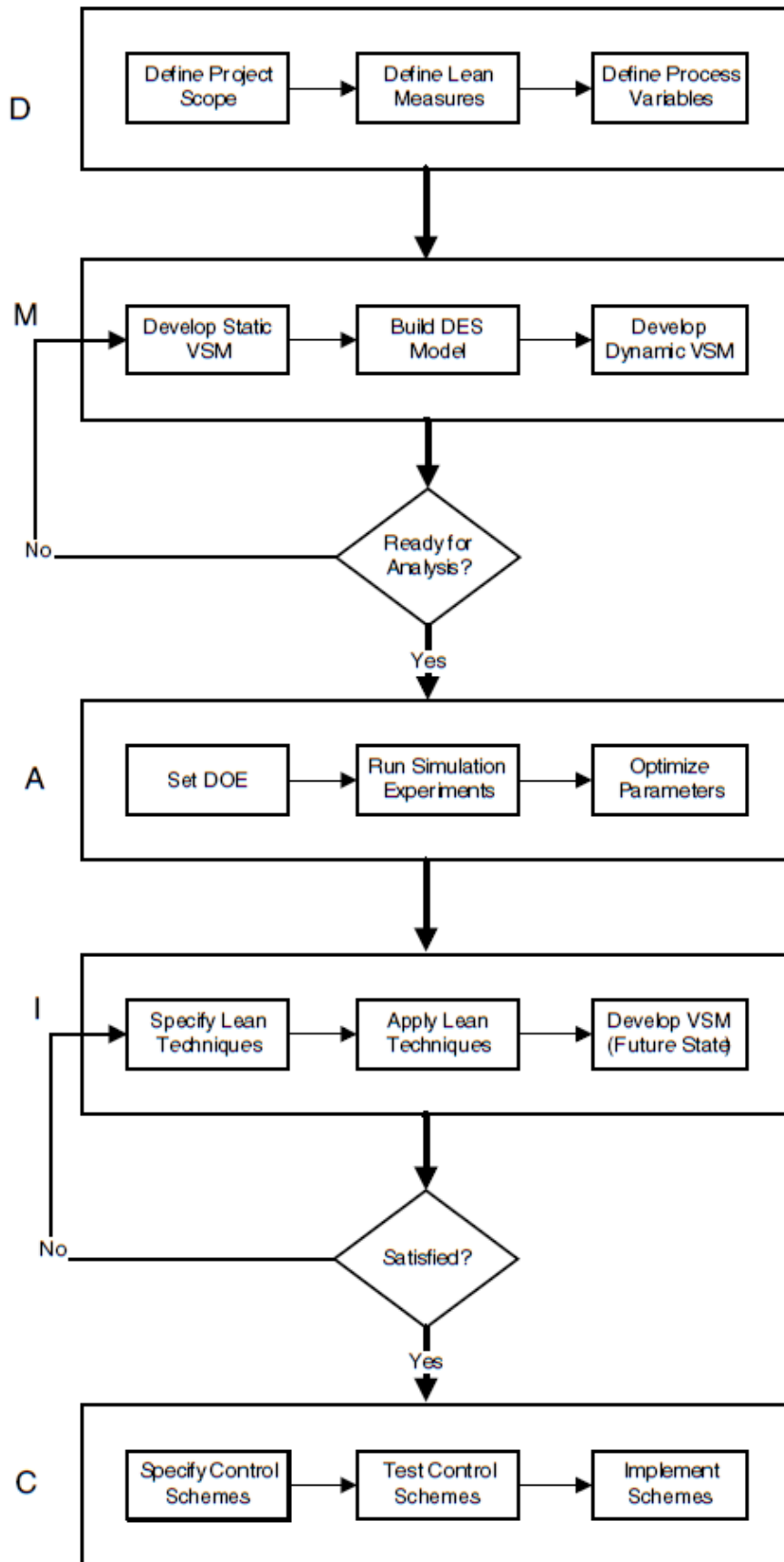


Abbildung 2.25: Fahrplan nach der Zusammenführung von Simulation und LSS [EA06]

3. Die Auswahl der geeigneten Simulationsvariante

In den vorherigen Kapiteln wurde zunächst die Problematik des Ultraschallschweißens bei der Firma Leopold Kostal vorgestellt. Anschließend wurden die statistischen Untersuchungsmöglichkeiten nach Six Sigma im Allgemeinen präsentiert und abschließend wurde gezeigt, welche verschiedenen Arten der simulativen Betrachtung eines Problems bestehen und wie diese in vorhandener Literatur mit der Six Sigma verknüpft werden.

In diesem Kapitel soll diskutiert werden, welches Verfahren aus den verschiedenen Simulationsarten (DES, Monte-Carlo-Simulation und kontinuierliche Simulation) am besten dazu geeignet ist in den DMAIC-Zyklus von Six Sigma integriert zu werden, um die Problematik des Ultraschallschweißens bei der Firma Leopold Kostal zu beheben. Anschließend wird die am besten geeignete Methode festgehalten und im folgenden Kapitel 4 wird gezeigt, an welcher Stelle konkret diese Simulationsmethode in die Six Sigma Untersuchungen eingebracht werden kann.

3.1. Kontinuierliche Simulation

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2. bei der Vorstellung der kontinuierlichen Simulation gezeigt wurde, basieren kontinuierliche Simulationsmodelle meist auf Differentialgleichungen. Im Gegensatz zur diskreten Simulation, ändern sich also die Zustandsgrößen im Laufe der Zeit nicht etwa von Ereignis zu Ereignis, wie es bei der DES der Fall wäre, sondern unter der Vorschrift der Differentialgleichung. Zum Lösen der Differentialgleichung sind meistens Initialwerte zum Zeitpunkt $t=0s$ vorgegeben [LAW15].

Bei der Betrachtung dieser Tatsache, ergibt sich für den Einsatz bei der Untersuchung des Ultraschallschweißverfahrens mithilfe von Six Sigma Methoden, lediglich eine Einsatzstelle für die kontinuierliche Simulation. Dem Fischgrätendiagramm der Anlage aus der Abbildung 4.5, in dem sich die verschiedenen Einflussfaktoren strukturiert betrachten lassen, lässt sich entnehmen, dass die Prozessparameter des Ultraschallschweißprozesses als mögliche Fehlerursache untersucht werden sollten. Diese bieten gegebenenfalls Freiraum für schwankende Parameter, wodurch der Prozess irreversibel gemacht wird. Dies wäre der Grund für die schwankende Qualität der Verschweißung der Folie. Dazu können mithilfe einer Differentialgleichung die Schwingungseigenschaften der Sonotrode untersucht werden. Durch die Differentialgleichung lässt sich beispielsweise die Amplitude oder der Phasengang der Schwingung ermitteln. Im nächsten Schritt besteht dann die Möglichkeit, das Umformverhalten der Kunststoffdome bei verschiedenen Amplituden und Phasengängen zu untersuchen. Dazu muss bestimmt werden, wie die Höhenabnahme der Kunststoffdome bei bestimmten Amplituden erfolgt und anschließend können so die

optimalen Prozessparameter wie z.B. Frequenz oder die Schwingungsdauer ermittelt werden. Des Weiteren lässt sich auf diese Art und Weise durch eine Simulation bestimmen, ob die Leistungs- oder Zeitgesteuerte Variante zu bevorzugen ist.

Im Falle der Ultraschallschweißanlage der Firma Leopold Kostal, lässt sich zum einen festhalten, dass der durch den Zufall geprägte Prozess, laut [Cell92] und [EST] nicht durch eine Differentialgleichung beschrieben werden kann und zum anderen, dass die Prozessparameter Amplitude und Schwingungsdauer anhand von Erfahrungswerten durch mehrfaches Probieren mit veränderten Parametern bestimmt wurden. Des Weiteren basiert die Auswahl, ob der Prozess Zeit- oder Leistungsgesteuert ablaufen soll, ebenfalls auf Erfahrungswerten von Kostal Mitarbeitern. Dementsprechend würde sich in Zukunft dieses Simulationsverfahren bei der Auslegung von neuen Prozessvarianten beim Ultraschallschweißen, insbesondere aber auch in der Measure Phase zum Beschreiben der Schwingung und zur Ermittlung von optimalen Prozessparametern eignen. Zur Lösung des Ultraschallschweißproblems, wäre es somit nicht geeignet.

3.2. Ereignisdiskrete Simulation

Bereits in Abschnitt 2.2.3. wurde die ereignisdiskrete Simulation ausführlich diskutiert. Dabei geht vor allem hervor, dass bei der ereignisdiskreten Simulation die Zeit in zwei möglichen Formen voranschreitet: auf der einen Seite springt die Zeit von Ereignis zu Ereignis und bei jedem Ereignis werden die Zustandsgrößen aktualisiert. Dabei sind die Zeitschritte, je nach Abstand der Ereignisse, beliebig groß. Auf der anderen Seite springt die Zeit immer in gleichgroßen Schritten Δt . Dabei kann ein Ereignis zwischen den Schritten liegen, muss aber nicht. Falls ein Ereignis zwischen zwei Zeitschritten liegt, werden die Zustandsgrößen auch hier aktualisiert. Bei beiden Verfahren wird die Simulation gestoppt, sobald eine Abbruchbedingung erfüllt ist.

Angesichts der Tatsache, dass ereignisdiskrete Simulationen des Öfteren zur Simulation von Produktionsprozessen und Warteschlangen verwendet werden, bietet sich die ereignisdiskrete Simulation also auch zur Integration in die Untersuchung des Ultraschallschweißprozesses mithilfe von Six Sigma bei der Firma Leopold Kostal an. Hierbei kann die ereignisdiskrete Simulation zu Beginn während der Define Phase, bei der Erstellung eines Prozessplans helfen. Dabei wird die gesamte Vormontageanlage als ein System mit vielen Unterprozessen modelliert. Die einzelnen Prozesse werden wie eine Art „Blackbox“ behandelt. Lediglich die In- und Output-Daten sind essentiell. Dadurch wird im Prinzip, wie es in [UMNO15] vorgeschlagen wird, ein dynamischer Prozessplan erstellt, was viel übersichtlicher als ein analoger Prozessplan ist und somit ein besseres Prozessverständnis hervorruft. Während der darauf folgenden Measure Phase, ist es wichtig die Prozessfähigkeit zu ermitteln. Dafür eignet sich das ereignisdiskrete Modell ebenfalls sehr gut. Mithilfe des

ereignisdiskreten Modells können Prozess-, Zyklus- und Wartezeiten sehr genau berechnet werden. Ferner können somit weitere Aspekte, neben den bereits bekannten Prozessfähigkeitsindizes und Kontrollkarten, zur Beurteilung der Prozessfähigkeit gewonnen werden. Durch einen Randomisierungsmechanismus kann der Zufall ebenfalls modelliert werden. Somit werden realitätsnahe Ergebnisse gewährleistet. Durch die Integration des Zufalls in das Simulationsmodell, kann während der Analyse Phase zur Ermittlung der Störfaktoren untersucht werden, welche Folgefehler durch eine Abweichung in einem produzierten Bauteil, in folgenden Produktionsschritten erzeugt werden. Auf diese Art und Weise lässt sich untersuchen, wie sich beispielsweise Produkttoleranzen auf den Produktionsprozess einwirken. Geht beispielsweise aus dieser Untersuchung hervor, dass keine strengen Regeln für die Toleranzen eines gekauften Bauteils erfüllt werden müssen, so kann diese Information an den Zulieferer weitergegeben werden. Anschließend kann sich der Zulieferer auch größere Toleranzen erlauben, wodurch die Kosten der Bauteile gesenkt werden. Andernfalls kann diese Untersuchung auch ergeben, dass die Toleranzen zu grob sind und bei weniger Streuung in den Toleranzen der Bauteile, bessere Ergebnisse geliefert werden. Während der Improve Phase besteht durch ein ereignisdiskretes Modell die Gelegenheit, eine Veränderung zur Verbesserung des Prozesses vor, dem oft kostenpflichtigen Einbau in die Anlage, zunächst digital zu überprüfen. Der Vorteil dabei ist, dass dem System dabei keine gravierenden Schäden hinzugefügt werden. Dadurch werden die möglichen Reparatur- und Instandhaltungskosten zur Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands eingespart. Sowohl in der Control Phase als auch in allen anderen Phasen, besteht die Möglichkeit den gesamten Ablauf, mehrmals durchlaufen zu lassen. Gerade mit Hinblick auf die Stabilität der Prozesse stellt diese Möglichkeit eine gute Gelegenheit dar, das Verhalten der Prozesse in der Zukunft zu ermitteln.

Der Grund, warum dieses Verfahren für die Untersuchungen dieser Bachelorarbeit nicht geeignet ist, ist der hohe Aufwand zur Abbildung der komplexen Zusammenhänge der Vormontageanlage. Würde das Problem in vereinfachte Darstellungen heruntergebrochen betrachtet werden, würden dadurch oft einige Schwachpunkte des Prozesses, bei denen Verbesserungspotential besteht, außer Acht gelassen werden. Des Weiteren würde sich die ereignisdiskrete Simulation, besser bei Problemen bezüglich der Zyklus- und Stillstandzeiten eignen, da durch die ereignisdiskrete Simulation dynamische Simulationen erstellt werden. Das Problem der Vormontageanlage allerdings, lässt sich auf diese Art nicht beseitigen. Vielmehr sind Methoden nötig, dessen Erkenntnisse auf statistischen Daten basieren, um somit bei der Integration in den Six Sigma DMAIC-Zyklus keine Schwierigkeiten zu haben. Dafür wird in Abschnitt 3.3. der Ansatz die Monte-Carlo-Simulation in den DMAIC-Zyklus von Six Sigma zu integrieren besprochen.

3.3. Monte-Carlo-Simulation

Wie es sich aus Abschnitt 2.2.4. entnehmen lässt, basieren Monte-Carlo-Simulationen auf statistischen Modellen und dienen zur Lösung von sowohl deterministischen, als auch stochastischen Problemen. Es ist eine Methode die während des zweiten Weltkriegs an Bedeutung gewonnen hat. Monte-Carlo-Simulationen sind dadurch geprägt, dass eine Vielzahl an statistischen Werten durch einen Zufallsgenerator erzeugt wird. Anschließend werden diese Werte durch deterministische Berechnungen weiterverwendet, um im letzten Schritt dann zu Erkenntnissen zu gelangen.

Beim Betrachten der Integrationsmöglichkeiten der Monte-Carlo-Simulation in den Six Sigma DMAIC-Zyklus mit Hinblick auf die Ultraschallverschweißung, ergibt sich hauptsächlich die Möglichkeit, eine Monte-Carlo-Simulation zur Beurteilung einer möglichen Verbesserung während der Improve Phase zu erstellen.

Um den aktuellen Stand der Anlage und nach einer möglichen Verbesserung, den neuen Stand der Anlage besser beurteilen zu können, wird eine Monte-Carlo-Simulation eingesetzt. Dabei werden einige Teile aus der laufenden Produktion entnommen und vermessen. Anhand dieser Teile wird der statistische Charakter der laufenden Produktion ermittelt und als Input-Variable in die Monte-Carlo-Simulation eingespeist. Anschließend werden mithilfe der Monte-Carlo-Simulation sehr viele Zufallszahlen generiert. Mit diesen Zufallszahlen werden dann deterministische Berechnungen mit Hinsicht auf die Standardabweichung und Varianz durchgeführt. Im letzten Schritt können dann die verschiedenen Stände der Anlage miteinander verglichen werden. Der Vorteil dieser Betrachtung liegt darin, dass durch die Vielzahl an generierten Zufallszahlen, das Ergebnis laut Gleichung (2.3.) immer genauer wird und sich somit die Zukunft des Prozesses vorhersagen lässt. Des Weiteren werden lediglich eine geringe, jedoch trotzdem repräsentative, Anzahl an Bauteilen aus der laufenden Produktion benötigt, womit zum einen die Kosten für die Produktion der Bauteile und zum anderen die Kosten für die Vermessung der Bauteile eingespart werden. Somit wird also ein Konzept erarbeitet, womit die Monte-Carlo-Simulation in den Six Sigma DMAIC-Zyklus integriert werden kann, um die aktuelle Güte der Ultraschallverschweißung zum einen zu beurteilen und zum anderen, die zukünftige Qualität der Schweißpunkte vorherzusagen. Diese Untersuchungen werden anschließend im folgenden Kapitel 4 ausführlich vorgestellt.

Im Allgemeinen lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass sich Monte-Carlo-Simulationen dazu eignen, viel Zeit und Aufwand für die Probenpräparation zu sparen. Dank den generierten Zufallszahlen werden keine weiteren Messungen mit realen Bauteilen aus der laufenden Produktion benötigt. Lediglich eine repräsentative Anzahl einer Stichprobe aus der laufenden Produktion ist ausreichend, um den statistischen Charakter des Prozesses für die Monte-Carlo-Simulation zu ermitteln. Die

Untersuchungen in Kapitel 4 werden zeigen, welche Schwierigkeiten und Bedingungen für dieses Integrationskonzept zu bewältigen sind.

Doch um die Anwendung einer Monte-Carlo-Simulation während der Improve Phase besser verstehen zu können, ist es nötig zunächst den Hintergrund der Untersuchungen zu erläutern. Die Firma Leopold Kostal hatte immer wiederkehrende Probleme bezüglich der Qualität der Ultraschallschweißpunkte. Dabei wurden in unbekanntem Abständen einige Schlechteile bei der Herstellung der Scheibenwischerbaugruppen produziert, deren Ursache nicht bekannt war. Die Schweißverbindung hatte keine ausgeprägte „Pilzform“, sodass die Leiterfolie nicht fest genug in ihrer Position gehalten werden konnte. So kam es zu dem Bedürfnis, das Verhalten der Vormontageanlage untersuchen zu lassen.

Wird ferner bei der Untersuchung der Anlage, die Begutachtung der Ergebnisse aus der Ultraschallschweißung bei der Firma Leopold Kostal betrachtet, so lässt sich feststellen, dass lediglich attributive Kontrollkarten existieren. Attributive Kontrollkarten wurden in Abschnitt 2.1.3. näher erläutert. Aus den vorhandenen Kontrollkarten ließ sich entnehmen, dass nahezu keine Schlechteile vorlagen. Das Problem an der attributiven Beurteilung allerdings war es, dass qualitativ weder sehr gute, noch sehr schlechte Verschweißungen diese Sichtkontrolle zwar bestehen, jedoch im Nachhinein sich die Schweißverbindung gelöst hat.

Somit haben sich also noch zwei wichtige Aufgaben ergeben, die in Kapitel 4 gelöst werden:

- Zum einen musste das Problem behoben werden, dass während der Faltung die Löcher der Leiterfolie von den Kunststoffdomen nicht getroffen und somit schlechte Schweißverbindungen erzeugt wurden.
- Zum anderen musste ein Messverfahren entwickelt werden, womit die Schweißverbindung begutachtet und dabei Zahlenwerte gemessen werden konnten, welche anschließend als statistische Grundlage einer Monte-Carlo-Simulation dienen sollten.

4. Die Integration von Simulation in Six Sigma

Nachdem im vorherigen Kapitel die Monte-Carlo-Simulation als geeignetste Simulationsmethode um in den DMAIC-Zyklus integriert zu werden herausgestellt und anschließend die am besten geeignete Stelle als die Improve Phase festgehalten wurde, werden im Folgenden die Untersuchungen bei der Firma Leopold Kostal zur Verbesserung des Ultraschallschweißprozesses, Schritt für Schritt anhand des DMAIC-Zyklus vorgestellt. Des Weiteren wird gezeigt, wie das Messverfahren zur Ermittlung der statistischen Grundlage abgelaufen ist und welche Werkzeuge aus der Six Sigma Umgebung während der Untersuchungen angewendet wurden.

4.1. Define Phase

Wie bereits in Abschnitt 3.3. erwähnt wurde, kam es in unregelmäßigen Abständen (z.B. mehrere Monate) dazu, dass verschweißte Scheibenwischerbaugruppen bei der Endkontrolle ausgefallen sind. Dabei hat sich gezeigt, dass die Leiterfolie aufgrund der mangelhaften Qualität der Schweißverbindung nicht mehr in Position gehalten wurde. Es hat sich rausgestellt, dass bei der Ultraschallschweißung keine ausreichend große Pilzform der verschweißten Kunststoffdome ausgebildet hatte. Bei der Betrachtung der vier Schweißpunkte einer Rastkurve, ließ sich folgende Erkenntnis gewinnen: aus unbekannter Ursache ist der Schweißpunkt, welcher sich von vorne betrachtend oben links befindet immer diejenige, die am ehesten dazu geneigt ist fehlerhaft zu sein. Dadurch kam es beim Einsetzen der verschweißten Bauteile in die Kunststoffgehäuse zum Einknicken der Leiterfolie, wodurch kein Lichtsignal mehr, von den sich auf der Leiterfolie befindenden LEDs, außerhalb des Gehäuses ankam. Die Ursache war, dass sich die herabstehende Leiterfolie an dem Gehäuse verhakt hat, was letztendlich unter dem Druck des Roboterarms zum Knicken der Leiterfolie geführt hat. Somit waren die Bauteile also nicht mehr funktionstüchtig. Da dieser Fehler allerdings erst zu einem sehr späten Zeitpunkt in der Produktionskette auffallen kann, war dieses Problem also mit hohen Schrottkosten verbunden.

Abbildung 4.1 zeigt den Critical to Quality-Baum mit Hinblick auf die Verschweißung. Durch einen Critical to Quality-Baum ist es möglich, die Wünsche bzw. Probleme des Kunden oder Auftragsgebers so zu operationalisieren, dass sie in eine messbare Größe umgewandelt werden. In diesem konkreten Beispiel ist es also erwünscht, dass der Ultraschallschweißprozess rundum gute Schweißverbindungen erzeugt. Als mögliche Qualitätskriterien lassen sich der Durchmesser des Schweißpunkts, die Höhe des Schweißpunkts, die Peelfestigkeit des Schweißpunkts und die attributive Beurteilung des Schweißpunkts festhalten. Die attributive Bewertung der Schweißpunkte wird bereits bei der Firma Leopold Kostal durchgeführt. Dafür entnimmt ein Einrichter in einem vier stündigen Zyklus, zehn

fertige Bauteile vom laufenden Band und kontrolliert die Güte der Schweißpunkte. Nach der Vorgabe der Qualitätsstelle muss ein Schweißpunkt nur die Bedingung erfüllen, dass die Leiterfolie fest genug in der gewünschten Position gehalten wird. Diese Kontrollen werden dann in attributive Kontrollkarten eingetragen, worauf später nochmal näher eingegangen wird.

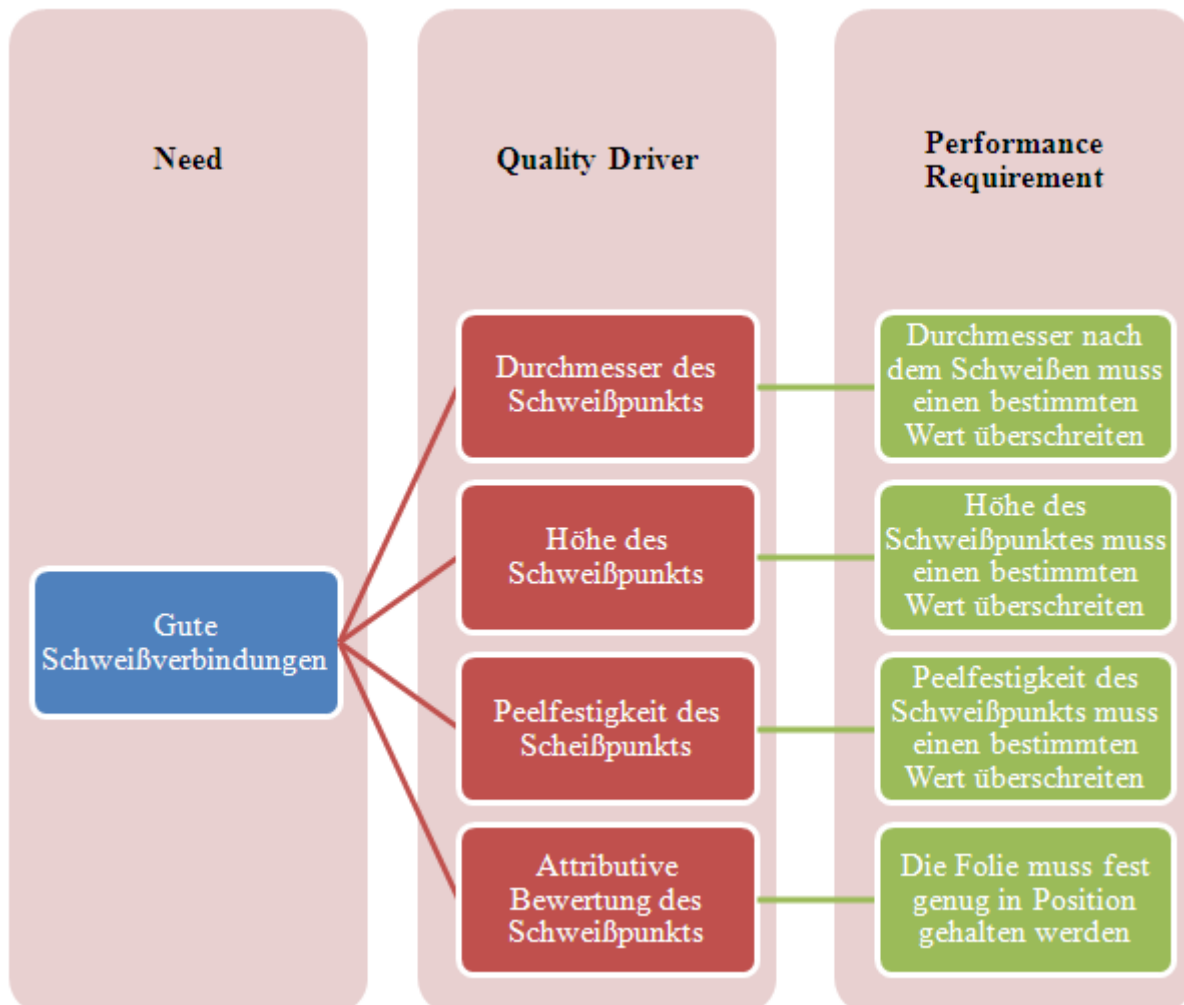


Abbildung 4.1: Critical to Quality-Baum des Ultraschallschweißprozesses

Da zur Bestimmung des Durchmessers und der Höhe komplizierte und automatisierte Messverfahren aufgestellt werden müssten, bleibt als umsetzbares Qualitätskriterium neben der attributiven Bewertung der Schweißpunkte, nur noch die Peelfestigkeit des Schweißpunkts. Bei dem sogenannten Peelttest werden mithilfe einer Zugprüfmaschine beispielsweise Lötstellen von anderen Bauteilen auf ihre Festigkeit kontrolliert. Es ist eine nicht zerstörungsfreie Messmethode. Da es bereits bei anderen Bauteilen mit Lötstellen durchgeführt wird, ist es ebenfalls für die Beurteilung von Schweißverbindungen geeignet.

Der Vorteil gegenüber der attributiven Beurteilung ist, dass konkrete Zahlenwerte ermittelt werden können, womit der Prozesszustand vergleichbar gemacht wird. Bei der attributiven Beurteilung wird lediglich entschieden, ob die Teile gut oder schlecht

sind. Einen Zwischenstatus gibt es dabei nicht. Ferner kann mithilfe des Peeltests untersucht werden, ob Bauteile, die bei der attributiven Beurteilung als in Ordnung eingestuft werden, jedoch beim Peeltest sich im „Mittelfeld“ des Spektrums befinden, im Nachhinein beim Einsetzen in das Gehäuse, zur Beschädigung der Folie führen. Des Weiteren untermauert diese stetige Ermittlung den Charakter von Six Sigma, seine Untersuchungen auf Zahlen, Daten und Fakten aufzubauen, welche im Anschluss als statistische Basis für die Monte-Carlo-Simulation dienen.

Nachdem das Problem erkannt war, war es zu Beginn der Untersuchungen zunächst nötig, den Prozess in seine Unterprozesse zu zerlegen, um einen besseren Überblick zu erhalten. Um die komplizierten Vorgänge während der automatisierten Herstellung der Baugruppen besser verstehen zu können, wurden bereits in Abschnitt 2.1. unter anderem in Abbildung 2.1 die gesamten Unterprozesse rund um den Ultraschallschweißprozess näher erläutert. Dadurch lässt sich ein besseres Prozessverständnis entwickeln um zum einen die Fehlerursache und zum anderen mögliche Integrationsmöglichkeiten für die Monte-Carlo-Simulation zu finden.

Da bei der Positionierung der Folie in Schritt 2 der Abbildung 2.1, die Folie durch Führungsstifte immer reproduzierbar abgelegt wird, kann sich dadurch im ersten Schritt auch kein Fehler eingeschlichen haben. Ferner beziehen sich die Prozessschritte 5 bis 7 auf die Trägerseite der Leiterfolie und haben dadurch keinen Einfluss auf die Verschweißungsqualität der Rastkurve, welche am anderen Ende der Leiterfolie mit dieser verschweißt wird. Somit ergeben sich also lediglich die Positionierung der Rastkurve auf der Folie in Schritt 4, die Faltung der Folie um die Rastkurve in Schritt 8 und der Schweißprozess mit seinen Prozessparametern in Schritt 9 als mögliche Fehlerquellen. Des Weiteren wurden die Abläufe der Vormontageanlage in Abschnitt 2.1. näher beschrieben. Dabei sind die Prozessverläufe sowohl bei der Herstellung der Blinkerbaugruppen, als auch bei der Herstellung der Scheibenwischerbaugruppen identisch.

Um alle Einflussfaktoren und Abhängigkeiten genauer zu betrachten, hilft eine SIPOC. Wie in Abschnitt 2.1.1. beschrieben wurde, steht SIPOC für Suppliers, Inputs, Process, Outputs und Customers. Dadurch wird z.B. sehr genau untersucht, woher die Bauteile kommen die bei diesem Prozess verarbeitet werden und wer anschließend die produzierten Teile zur Weiterverwendung bekommt. In der nachfolgend illustrierten Tabelle 4.1 ist die SIPOC des Ultraschallschweißprozesses der Vormontageanlage aufgefasst. Da während des Ultraschallschweißprozesses lediglich zwei Komponenten (Leiterfolie und Rastkurve) miteinander verbunden werden, hat die SIPOC nur zwei Zeilen. In der ersten Zeile wird die Leiterfolie näher betrachtet. Dabei steht SWS für die Bezeichnung der Scheibenwischerbaugruppen. FAS wäre die Bezeichnung der Blinkerbaugruppen. Es lässt sich der Zulieferer für die Leiterfolien entnehmen. Dabei

befindet sich die SMD Anlage ebenfalls bei der Firma Leopold Kostal in Lüdenscheid. Somit ist also die SMD Anlage auch eine potentielle Fehlerquelle, die untersucht werden muss. Dabei werden in der SMD Anlage zwei verschiedene Varianten der Folie produziert. Zum einen Leiterfolien mit 3 LEDs und zum anderen mit 4 LEDs. Als nächstes werden die einzelnen Prozessschritte, in der die Leiterfolie involviert ist aufgezählt. Da in der Wirklichkeit diese Schritte in einer sehr hohen Geschwindigkeit ablaufen, ist es an dieser Stelle sinnvoll diese Schritte aufzulisten. Somit ist sichergestellt, dass kein Prozessschritt außer Acht gelassen wird. Als Output wird dann das verschweißte Bauteil ausgegeben. Der nächste „Verbraucher“ dieser vormontierten Baugruppe ist der Arbeitsgang 40 (AG40) der Firma Leopold Kostal. AG40 ist ein Handarbeitsplatz, an dem diese vormontierten Baugruppen, manuell in die Blinker- und Scheibenwischerhebel eingesetzt werden. Es ist wichtig zu wissen, wer diese fertigen Baugruppen weiterverwendet, denn würden diese Bauteile beispielsweise durch LKWs zum nächsten Verbraucher transportiert werden, könnte es vorkommen, dass auf dem Weg die Bauteile beschädigt werden. Da sich allerdings der nächste Verbraucher in unmittelbarer Nähe zur Vormontageanlage befindet und die Bauteile bereits in ein Gehäuse eingesetzt wurden, lässt sich der Transport zur nächsten Station als Fehlerursache ausschließen. Somit wird klar, dass bezüglich der Leiterfolie lediglich die SMD Anlage oder der Ultraschallschweißprozess an sich als mögliche Fehlerursache in Frage kommt.

Tabelle 4.1: SIPOC des Ultraschallschweißprozesses

Supplier	Input	Process	Output	Customer
SMD (intern)	Folie SWS	Positionieren – Durch Rastkurve in Faltbrille drücken – Runterfahren - Ultraschallschweißen	Mit Rastkurve dauerhafte Verbindung	AG40
Spritzerei (intern)	Rastkurve SWS	Rastkurve aufnehmen – auf Folie Positionieren – Runterfahren – Ultraschallschweißen	Mit Folie dauerhafte Verbindung	AG40

In der zweiten Zeile der SIPOC wird die Rastkurve betrachtet. Der Lieferant der Rastkurven ist ebenfalls intern. Es fällt auf, dass die Rastkurven aus vier verschiedenen Nestern abstammen. Deshalb sollte an dieser Stelle festgehalten werden, dass es möglicherweise sinnvoll ist, in den nachfolgenden Untersuchungen die Rastkurven nach ihrem Abstammungsnest zu trennen. Schließlich ist der Rest der

SIPOC Tabelle im Prinzip identisch zur ersten Zeile. Somit sollte an dieser Stelle festgehalten werden, dass als mögliche Fehlerursachen die verschiedenen Folienvarianten aus SMD Anlage, die verschiedenen Nester der Rastkurven und der Prozess an sich, mit seinen Prozessparametern in Frage kommen.

Nachdem die Kundenwünsche in messbare Größen operationalisiert, eine Übersicht des Prozesses mithilfe des Flussdiagramms zum Prozessablauf in Abbildung 2.1 erstellt und die Abhängigkeiten der Prozesselemente mithilfe der SIPOC in Tabelle 4.1 behandelt wurden, geht es im folgenden Abschnitt 4.2. mit der Ermittlung der Daten weiter.

4.2. Measure Phase

Für den stetigen Peelttest mit den Rastkurven, musste zunächst der Versuchsstand entsprechend angepasst werden. Dazu war es nötig, dass eine Aufnahmevorrichtung angefertigt wird, womit die Rastkurven in die Zugprüfmaschine eingespannt werden können. Nachdem diese Aufnahmevorrichtung aus einem Aluminiumblock gefräst wurde, war als nächstes noch die Erstellung eines neuen Prüfprogramms für die Rastkurven nötig. Diese wurde mithilfe eines Mitarbeiters der Firma Leopold Kostal angefertigt und somit war eine funktionstüchtige Prüfvorrichtung zur Beurteilung der Schweißverbindungen erschaffen. Als nächstes war es nötig die fertigen Bauteile so zu präparieren, dass die Folie in die Zugprüfmaschine eingespannt werden konnte. Dafür hat sich der Autor entschieden, alle vier Schweißpunkte unabhängig voneinander auf ihre Peelfestigkeit zu prüfen. Dadurch waren gegenseitige Einflüsse ausgeschlossen. Um also die Schweißpunkte einzeln auf ihre Festigkeit zu prüfen, musste die Leiterfolie an einigen Stellen mithilfe eines Skalpells in kleine Streifen geschnitten werden. Des Weiteren war somit gewährleistet, dass die Folienstreifen lediglich von den Schweißpunkten in Position gehalten wurden, wodurch beim Peelttest die gesamte Belastung in den Schweißpunkt einwirken konnte. Außerdem mussten die rippenförmigen Stellen der Rastkurven ebenfalls entfernt werden, da ansonsten die Spannbacke die Folienstreifen nicht greifen konnte.

Nachdem es feststand, dass der Peelttest mit den Rastkurven realisiert werden kann, war es nun nötig einen Versuchsplan aufzustellen. Aufgrund der Tatsache, dass diese Art der Beurteilung für die Rastkurven sehr neu war, gab es keinerlei Erfahrungswerte wie groß die Stichprobengröße sein sollte. Des Weiteren musste beachtet werden, dass eine zu große Stichprobengröße mit hohen Kosten und sehr großem Aufwand verbunden war, wohingegen bei einer zu kleinen Stichprobengröße die Gefahr besteht, dass die Ergebnisse der Untersuchungen nicht repräsentativ sein könnten. Außerdem sollte bei der Ermittlung der Daten, auf die bereits gewonnenen Erkenntnisse Beachtung geschenkt werden. So sollten nach der SIPOC aus Tabelle 4.1, die Untersuchungen strikt nach der Anzahl der LEDs und dem Herkunftsnetz unterteilt

werden, um einen möglichen signifikanten Einfluss dieser Variablen nicht zu vernachlässigen. Somit kam es zu insgesamt acht Fällen: jeweils drei oder vier LED-Leiterfolie (also zwei Varianten), mit der Rastkurve eins bis vier. Als eine nachvollziehbare Stichprobengröße wurde gemeinsam im Gespräch mit den Betreuern dieser Arbeit bei der Firma Leopold Kostal, zehn Teile pro Fall festgelegt. Nach diesem Schema wurden dann also insgesamt 80 Messungen durchgeführt.

Um die Vertraulichkeit der ermittelten Daten zu gewährleisten, wurde eine Messsystemanalyse nach Gauge R&R durchgeführt. Dabei geht aus der Statistik Software Minitab hervor, dass es sich um eine geschachtelte Messsystemanalyse handeln muss, da der Peeltest eine zerstörende Prüfung ist und bereits vermessene Teile nicht erneut geprüft werden können. Die Richtlinie aus [TK09] wird in Tabelle 4.2 sinngemäß wiedergegeben. Dabei beschreibt die Tabelle die Grenzen, wo sich der Koeffizient aus der Messsystemanalyse befinden muss, um noch als annehmbar, bedingt annehmbar oder nicht annehmbar zu gelten.

Tabelle 4.2.: Grenzen für die Messsystemanalyse nach [TK09]

R&R Koeffizient	\leq	10%	In Ordnung
	=	10% - 30%	Noch akzeptabel
	$>$	30%	Nicht akzeptabel

Bei der Betrachtung der in der Abbildung 4.2 abgebildeten Ergebnisse aus der geschachtelten Messsystemanalyse für den Peeltest, fällt der hier gelblich markierte Koeffizient der Messsystemanalyse auf. Mit einem Wert von 4,71465 % liegt der Peeltest also im annehmbaren Bereich und alle nachfolgenden Untersuchungen und Erkenntnisse sind statistisch akzeptierbar. Dabei muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass bei der Betrachtung der Messsystemanalyse lediglich die Werte des kritischsten Schweißpunkts als Basis genommen wurden. Alle weiterführenden Untersuchungen und Erkenntnisse sind dementsprechend bezüglich dieses Schweißpunkts statistisch abgesichert.

Messsystemanalyse R&R				
Messquelle		Variation (6*Std.-Abw.)		ist gleich 6*sqrt von
Wiederholbarkeit	(EV)	0,000000	Messsystemvariation	V(innerhalb)
Reproduzierbarkeit	(AV)	0,496394	Bewertervariation	V(LED) + V(NEST[LED])
LED		0,323412		V(LED)
NEST[LED]		0,376579		V(NEST[LED])
Messsystemanalyse R&R	(RR)	0,496394	Messungsvariation	V(innerhalb) + V(LED) + V(NEST[LED])
Teilevariation	(PV)	10,517047	Teilevariation	V(Teil)
Gesamtvariation	(TV)	10,528755	Gesamtvariation	V(innerhalb) + V(LED) + V(NEST[LED]) + V(Teil)

6 k
 4,71465 % Messsystemanalyse R&R = 100*(RR/TV)
 0,0472 Präzision zu Teilevariation = PP/PV
 29 Anzahl der verschiedenen Kategorien = 1,41(PV/RR)
 Die letzte Spalte „Teil“ wird für „Teil“ verwendet.

Varianzkomponenten für Messsystemanalyse R&R						
Komponente	Varianzkomponente	% von Gesamt	% von			
			20	40	60	80
Messsystemanalyse R&R	0,0068446	0,22				
Wiederholbarkeit	0,0000000	0,00				
Reproduzierbarkeit	0,0068446	0,22				
Teil-zu-Teil	3,0724524	99,78				

Abbildung 4.2: Auszug aus der Statistik Software JMP, zur Messsystemanalyse des Peeltests

Neben den stetigen Untersuchungen mithilfe des Peeltests, ist es sinnvoll eine Messsystemanalyse mit der attributiven Beurteilung der Schweißpunkte durchzuführen, um einschätzen zu können, ob die vorhandene Messmethode fähig ist die Qualität der Schweißpunkte zu beurteilen. Das Verfahren zur Beurteilung der Fähigkeit eines Messsystems bei attributiven Daten ist nicht konkret definiert. Deshalb wurde eine möglichst sinnvolle und nachvollziehbare Messsystemanalyse folgendermaßen durchgeführt: zunächst wurden zehn Teile ausgesucht, wodurch das gesamte Spektrum der Schweißergebnisse gedeckt wurde. Einige Teile waren also sehr gut verschweißt, einige waren gerade eben noch gut verschweißt und andere sehr schlecht verschweißt. Diese Teile wurden in Absprache mit der Qualitätsstelle ausgesucht. Anschließend wurden diese zehn Teile durchnummeriert und zu jedem Teil wurde die Nummer und die Bewertung des Experten (1 steht für sehr gut und 3 für sehr schlecht) notiert. Danach wurde die Nummerierung so abgeklebt, dass die Teile vollständig anonymisiert werden konnten. Da die Einrichter in jeder Schicht in einem vier stündigen Zyklus die Teile bewerten, müssen sie diesem Test unterzogen werden. Dafür werden die Teile anonymisiert und gut vermischt. Der Einrichter muss dann die Güte des Schweißpunkts beurteilen. Der Testleiter muss dann die Verdeckung des Teils abnehmen und die Bewertung des Einrichters zu dieser Nummer, welche sich unter der Verdeckung befindet, notieren. Der Einrichter darf zu keinem Zeitpunkt des Tests erfahren, welche Teilnummer welche Qualität hat. Nachdem alle zehn Teile durch den Einrichter beurteilt wurden, werden die Teile erneut vermischt und anschließend nocheinmal dem Einrichter vorgeführt. Dieser muss dann eine erneute

Beurteilung der Teile durchführen. Der Gedanke dabei ist es, zum einen herauszufinden ob die Einrichter schlechte Schweißpunkte auch als solche identifizieren können und zum anderen ob sie reproduzierbar genug mit ihrer eigenen Beurteilung übereinstimmen. Dabei wäre ein Anhaltswert zur Überprüfung der Fähigkeit des Messsystems, eine durchschnittliche Übereinstimmung der Ergebnisse von 70-80% untereinander und mit der Expertenmeinung. Die Ergebnisse dieser attributiven Messsystemanalyse sind der folgenden Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Tabelle 4.3: Ergebnisse aus der attributiven Messsystemanalyse

Nummer	Experte	Prüfer 1	Prüfer 1	Prüfer 2	Prüfer 2	Prüfer 3	Prüfer 3
		Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 1	Durchgang 2
1	1	1	2	1	1	1	1
2	2	2	2	1	2	2	2
3	2	2	2	2	2	2	2
4	1	2	1	1	1	1	1
5	2	2	2	2	1	2	2
6	3	3	3	3	3	3	3
7	1	2	1	1	1	1	1
8	3	3	3	2	3	3	3
9	1	2	2	1	1	1	1
10	3	3	3	3	3	3	3

Nummer	Experte	Prüfer 4	Prüfer 4	Prüfer 5	Prüfer 5	Prüfer 6	Prüfer 6
		Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 1	Durchgang 2
1	1	1	1	1	1	2	2
2	2	1	2	2	2	2	2
3	2	3	2	3	3	2	2
4	1	1	1	2	1	1	2
5	2	2	1	2	3	2	2
6	3	3	3	3	3	3	3
7	1	1	1	1	1	1	2
8	3	3	3	3	3	3	3
9	1	1	1	2	2	1	2
10	3	3	3	3	3	3	3

Es lässt sich entnehmen, dass in genau 14 von 60 Fällen eine Abweichung von der ursprünglichen Beurteilung stattgefunden hat. Das bedeutet eine 76,7%ige Übereinstimmung mit der ursprünglichen Bewertung. Des Weiteren lässt sich entnehmen, dass in 120 Beurteilungen insgesamt 21 Mal von der Expertenmeinung abgewichen wurde. Dies bedeutet eine Übereinstimmung mit dem Experten von 82,5%. Es lässt sich also festhalten, dass bei vielen Unterschieden zur Expertenmeinung, die Bewertung der Einrichter skeptischer waren, was in der Realität bedeuten würde, dass sie eher ein noch gutes Bauteil als schlecht beurteilen würden. Dies ist zwar für die Firma Kostal von Vorteil, dennoch verdeutlicht diese Messsystemanalyse, dass die attributive Beurteilung der Schweißpunkte nah an der unteren Akzeptanzgrenze von 70-80% arbeitet und das das Messsystem ausbaufähig ist. Somit wird die Wichtigkeit der Untersuchungen mithilfe des Peeltests noch einmal verdeutlicht.

Am Ende der Measure Phase ist es nötig, den aktuellen Stand des Prozesses festzuhalten. Dazu eignen sich mehrere Werkzeuge: beispielsweise beschreiben Cp-Indizes die Fähigkeit eines Prozesses und Kontrollkarten geben eine Übersicht über den Verlauf der Werte. Nachfolgend wird in Abbildung 4.3, die Einzelwertkarte mit der zugehörigen gleitenden Spannweite der ermittelten 80 Werte aufgeführt.

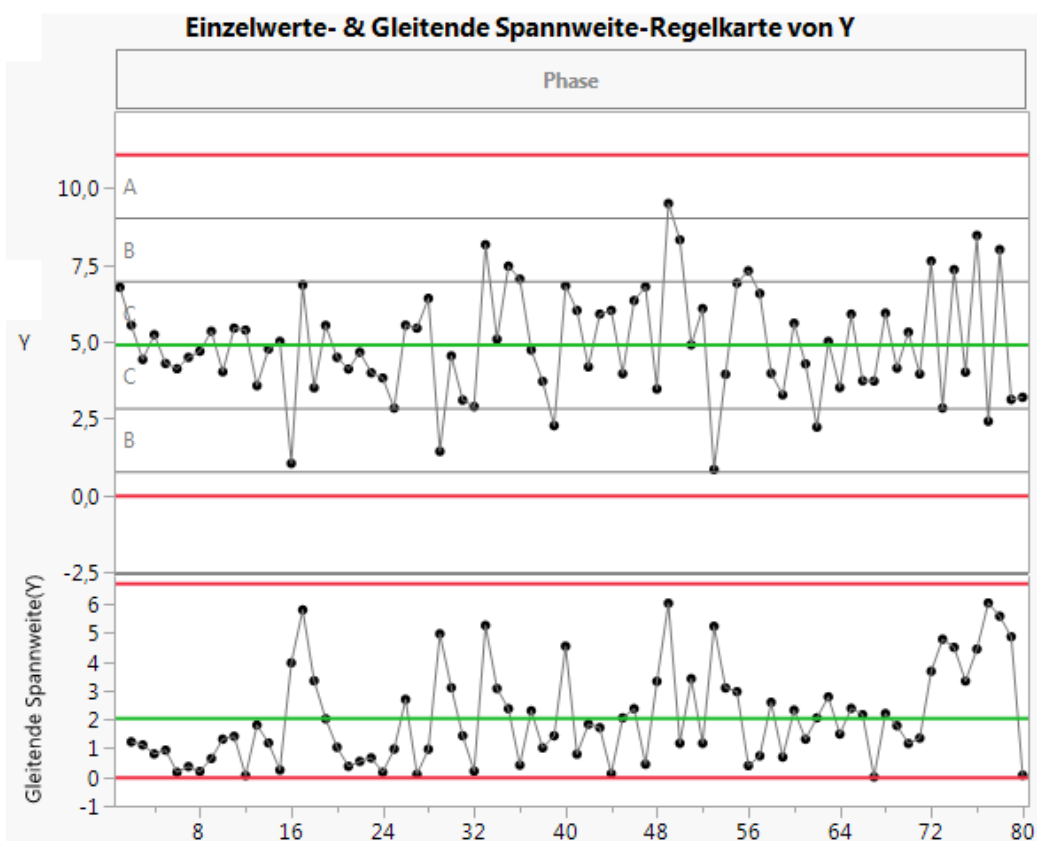


Abbildung 4.3: Einzelwertkarte des Ultraschallschweißprozesses

Bei der Betrachtung der Einzelwertkarte lässt sich zunächst sagen, dass kein charakteristisches Muster der Werte vorliegt. Somit ist ein systematischer Effekt, welcher sich daraus ableiten würde sehr unwahrscheinlich. Des Weiteren lässt sich jedoch schließen, dass der Prozess sehr instabil ist, da sehr viele Werte in Bereich B liegen und die Werte eine große Streuung aufweisen. Ein Wert liegt sogar in Bereich A, wodurch der schwankende Charakter des Prozesses nochmal untermauert wird. Die Werte auf der y-Achse sind die Peelkräfte in Newton. Die x-Achse beschreibt die Teilnummer.

Für die Berechnung eines Cp-Indizes sind firmenspezifische Spezifikationsgrenzen nötig. Da der Peelttest für die Schweißpunkte des Ultraschallschweißverfahrens mit dieser Arbeit neu angewendet wurde, bestehen keine Vorgaben der Firma Leopold Kostal. Somit lässt sich kein sinnvoller Cp-Index zur Beschreibung der Prozessfähigkeit berechnen.

Um dem Prozess mehr Sicherheit zu verleihen und einen stabilen Prozess zu generieren, werden in der folgenden Analyse Phase weiterführende Untersuchungen durchgeführt.

4.3. Analyse Phase

Da aus der Kontrollkarte kein systematischer Effekt erkannt wurde, wird als nächstes eine ANOVA durchgeführt, um die Erkenntnisse aus der SIPOC in Abschnitt 4.1. zu untersuchen. Zusammenfassend hat sich bei der SIPOC herausgestellt, dass entweder die Folienvariante aus der SMD-Anlage, das Nest beim Druckgießen der Rastkurve oder die Prozessparameter an sich als Fehlerquelle in Frage kommen. Mithilfe der ANOVA lässt sich untersuchen, ob die Faktoren: Anzahl der LEDs auf der Leiterfolie und Herkunftsnest der Rastkurve einen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Schweißpunkte haben. Bei der ANOVA wird ein sogenannter F-Test durchgeführt. Dabei werden die Faktoreffekte zunächst einzeln und anschließend in Kombination betrachtet. Die Ergebniswerte (F-Werte) davon dürfen das sogenannte Signifikanzniveau 0,05 nicht unterschreiten. Falls die F-Werte also unterhalb von 0,05 liegen, handelt es sich um einen signifikanten Einfluss des Faktors. In der Abbildung 4.4 ist ein Auszug aus der ANOVA, welche mithilfe der Statistik Software JMP erstellt wurde dargestellt. Die F-Werte sind zur Hervorhebung gelblich markiert. Es lässt sich entnehmen, dass keines der Faktoren und auch die Kombination der Faktoren einen signifikanten Einfluss auf die Güte des kritischen Schweißpunkts haben.

Effekttests						
Quelle	Anzahl		Summe	F-Wert	Wahrsch.	> F
	Parameter	Freiheitsgrade				
LED	1	1	3,228061	1,0506	0,3088	
NEST	3	3	14,413144	1,5637	0,2056	
LED*NEST	3	3	4,257924	0,4619	0,7097	

Abbildung 4.4: ANOVA der Faktoren LED und NEST

Da durch die ANOVA ebenfalls nicht der Grund für die schwankenden Prozessergebnisse gefunden werden konnte, hilft es in diesem Fall ein Ishikawa-Diagramm zu erstellen. Wie bereits im Abschnitt 2.2.3. vorgestellt wird, bietet ein Ishikawa (oder Fischgräten) -Diagramm die Möglichkeit, eine strukturierte Ansicht der Zusammenhänge zu generieren. Das Ishikawa-Diagramm für die Ultraschallverschweißung ist in der folgenden Abbildung 4.5 dargestellt. Aus dem Ishikawa-Diagramm lassen sich prinzipiell zwei Einflussfaktoren herausfiltern, wodurch die Abweichungen in der Qualität ausgelöst werden könnten. Die restlichen Einflussfaktoren lassen sich nach den Betreuern dieser Arbeit bei der Firma Leopold Kostal, durch ihre Erfahrung ausschließen. Da das Problem bereits seit langer Zeit bestand, wurden vor dieser Arbeit viele Voruntersuchungen und Versuche zur Behebung des Problems durchgeführt, auf dessen Erkenntnisse die Erfahrung der Betreuer beruht. Die Erfahrung der Betreuer wurde bei dieser Arbeit ebenfalls in Betracht gezogen. Beispielsweise wurde bei der Frage ob es richtig ist, dass eine Seite der Rastkurve durch eine leistungsgesteuerte Sonotrode und die andere mithilfe einer zeitgesteuerten Sonotrode verschweißt wird, durch mehrere Testläufe vor den Untersuchungen dieser Arbeit von den Betreuern der Arbeit bereits entschieden. Der Unterschied wird bereits in Abschnitt 2.1. erklärt. Außerdem wurde in Abschnitt 4.2. dieser Arbeit gezeigt, dass die attributive Beurteilung der Schweißpunkte als ausbaufähig gilt. Deshalb ergeben sich aus dem folgenden Fischgräten-Diagramm zum einen die Toleranzen der einzelnen Bauteile und zum anderen der Falt- und Schweißprozess an sich als eine mögliche Fehlerursache, welche zu untersuchen sind.

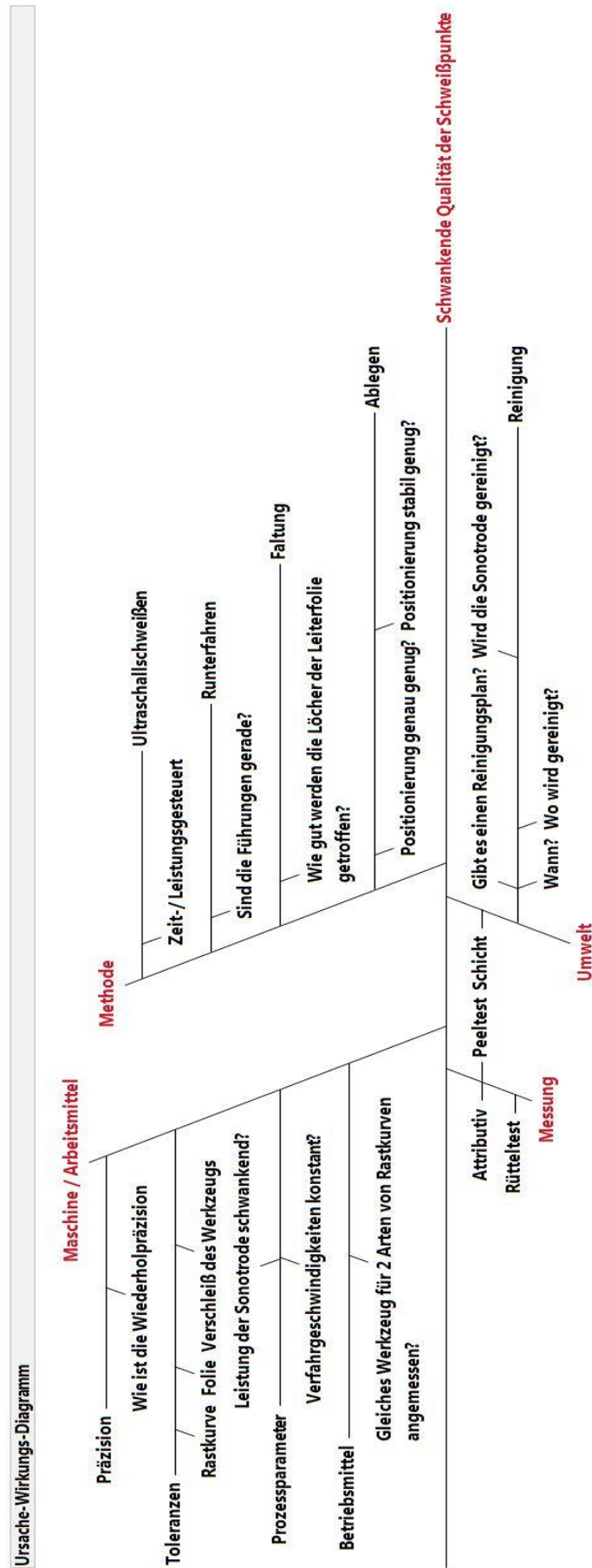


Abbildung 4.5: Ishikawa-Diagramm zur Vormontageanlage

Um diese Fehlerquellen nacheinander auszuschließen, wurden zum einen die Toleranzen der beteiligten Materialien – also Rastkurve und Leiterfolie – durch Vermessen ermittelt und mit den Werten aus den technischen Zeichnungen verglichen. Dafür wurden in verschiedenen Schichten, in nicht äquidistanten Zeitabständen, Leiterfolien und Rastkurven aus der laufenden Produktion entnommen und an einem Profilprojektor vermessen. Dadurch wurde außerdem gewährleistet, dass die schwankende Prozessstabilität einen Einfluss der verschiedenen Schichten enthält. Da sich keine Abweichungen aus den vorgeschriebenen Toleranzen ergaben, konnten die Materialtoleranzen als Fehlerursache eliminiert werden.

Um die komplizierten Abläufe während der Positionierung der Rastkurve auf der Leiterfolie und bei der Faltung der Folie um die Rastkurve besser verstehen zu können, hat der Autor schließlich die Abläufe manuell betrachtet. Dafür wurden die Prozessschritte in der Vormontageanlage von Hand nachgemacht und die kritischen Stellen untersucht. Diese Maßnahme war nötig, da die Vormontageanlage ansonsten unter einem zu schnellen Tempo arbeitet, sodass keine Details des Prozesses erkennbar sind. Dabei ist aufgefallen, dass bei der Positionierung der Rastkurve zu viel Spiel vorhanden ist. Beim Ablegen der Rastkurve in die Faltrastmatrize hat sich herausgestellt, dass sich die Rastkurve senkrecht zur Schweißrichtung verschieben ließ. Dies hatte zur Folge, dass während der Faltung der Folie, die Kunststoffdome der Rastkurve, die Löcher der Leiterfolie nicht getroffen hatten, je nachdem an welchem Anschlag des Spiels die Rastkurve abgelegt wurde. So wurden also die Kunststoffdome zum Teil unterhalb der Leiterfolie geplättet, wodurch der Schweißpunkt nicht die gewünschte Fähigkeit besitzen konnte, die Folie fest genug an der Rastkurve zu positionieren. Vielmehr wurde die Leiterfolie an dieser Stelle lediglich durch zufällig auf die Oberfläche der Leiterfolie gelangte Teile des Kunststoffdoms festgehalten. Diese waren aber bei jedem Teil unterschiedlich. So ließ sich also erklären, wie es zu dem schwankenden Charakter des Schweißpunkts gekommen ist. Abbildung 4.6 zeigt, wie sich der kritische Schweißpunkt verhält, wenn die Rastkurve am linken oder rechten Anschlag des Spiels abgelegt wird. Auf der linken Seite ist das Problem in rot eingekreist. Es ist erkennbar, dass die Leiterfolie um den Kunststoffdom herum gefaltet wird, wohingegen auf der rechten Seite der Kunststoffdom, das Loch der Leiterfolie getroffen hat und oberhalb von der Leiterfolie „geplättet“ werden kann. Außerdem ist es erkennbar, dass die Rastkurve auf dem linken Bild, nicht an der metallischen Matrize anliegt und sich somit auf der falschen Seite des Spiels befindet, wohingegen dies auf dem rechten Bild nicht der Fall ist. Damit dieser Fehler erkannt wird, musste die obere Hälfte der Rastkurve abgesägt werden.

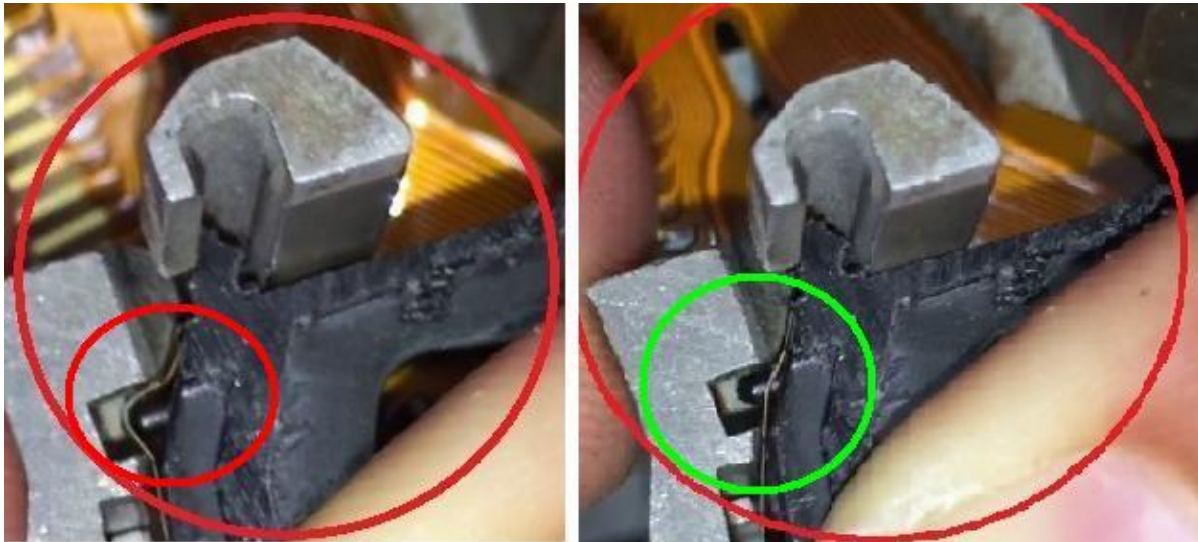


Abbildung 4.6: Darstellung des Problems, wenn zu viel Spiel bei der Rastkurvenpositionierung vorhanden ist

Als Beweis der oben genannten Hypothese, hat sich der Autor einen zusätzlichen Versuchsaufbau überlegt. Dazu wurde die Leiterfolie, manuell von Hand um die Rastkurve gefaltet und in dieser Position an die Rastkurve, mithilfe von Klebefolie festgeklebt. Der Gedanke dabei ist es, die problematische Faltung der Anlage abzunehmen, um zu prüfen, ob eine perfekt gefaltete Folie-Rastkurve Kombination, ebenfalls ein optisch schlechtes Schweißergebnis verursacht. Falls dies der Fall wäre, müsste untersucht werden, ob die Schweißparameter tatsächlich die richtigen sind. Bei der Umsetzung kam es zu einigen Komplikationen. Es mussten sämtliche Licht- und manuelle Schranken überbrückt werden, da die Anlage ansonsten die Rastkurve als ein Schrottteil identifiziert und den Prozess gestoppt hätte. So ließ sich ein Bauteil produzieren, an dem eindeutig erkennbar war, dass das Bauteil sehr gut verschweißt wurde. Auf diese Weise war garantiert, dass zum einen die Prozessparameter in Ordnung sind und zum anderen, dass die Faltung der Leiterfolie um die Rastkurve Probleme verursacht.

Um diese Erkenntnis zu nutzen, wird im nächsten Abschnitt 4.4. eine Möglichkeit vorgestellt das Problem zu beheben. Anschließend wird mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation die Verbesserung auf ihre statistische Sicherheit überprüft.

4.4. Improve Phase

Während der manuellen Untersuchungen in der Vormontageanlage war aufgefallen, dass die Dome der Rastkurve die Löcher der Leiterfolie während des Faltens getroffen haben, wenn die Rastkurve in eine bestimmte Richtung bis zum Anschlag gedrückt wird. Andernfalls ist es dazu gekommen, dass der Dom, welcher im Endeffekt den Schweißpunkt oben links gebildet hat, nicht das Loch der Folie getroffen hat. Daraus lässt sich schließen, dass dieser Dom unterhalb der Leiterfolie verschweißt wurde, wodurch die unzureichende Schweißung zustande gekommen ist. In dieser Phase werden die Untersuchungen zur Behebung dieses Problems vorgestellt und ein Konzept für zukünftige Untersuchungen mit der Kombination von Simulation und Six Sigma erarbeitet.

Zur Behebung dieses Problems haben sich zunächst einige Umsetzungsmöglichkeiten gefunden. Beispielsweise könnte die Matrize, in der die Rastkurve durch den Roboter auf die Folie abgelegt und verschweißt wird, konisch umgebaut werden. Dadurch wäre gewährleistet, dass die Rastkurve bei der Ultraschallschweißung immer am selben Ort verschweißt würde. Ein Problem wäre aber, dass durch die konische Matrize entweder Material der Rastkurve abgeschabt wird oder sich die Rastkurve in der Matrize verkantet, falls die Rastkurven das Maximum ihrer Toleranz ausschöpfen würden. Falls die konische Form der Matrize jedoch noch größer wäre, wäre das Problem des zu großen Spiels erneut vorgekommen.

Während einer Besprechung mit den Betreuern dieser Arbeit bei der Firma Leopold Kostal, wurde dann eine federnde Leiste als Abhilfe vorgeschlagen. Diese Leiste sollte in einen per Drahterosion in die Matrize eingebrachten Schlitz eingebaut werden und während dem Einsetzen der Rastkurve in die Matrize, diese in die gewünschte Position drücken. Wie bereits in Abbildung 4.6 deutlich wird, ist diese Maßnahme für die Produktion von guten Schweißergebnissen erforderlich. Dabei muss festgehalten werden, dass die restlichen Schweißpunkte durch diese Maßnahme nicht beeinflusst wurden. In der Abbildung 4.7 ist eine Prinzip Skizze zur Funktionsweise und zum Einbauort der Federleiste dargestellt. Dabei lässt sich der Skizze nur entnehmen, dass lediglich die Führungsleiste der Rastkurve angeschnitten dargestellt wird. Die Matrize wird ebenfalls abgeschnitten dargestellt, da diese Details für die Funktionsweise nicht entscheidend sind. Ein roter Pfeil verdeutlicht, in welche Richtung die Rastkurven gedrückt werden.

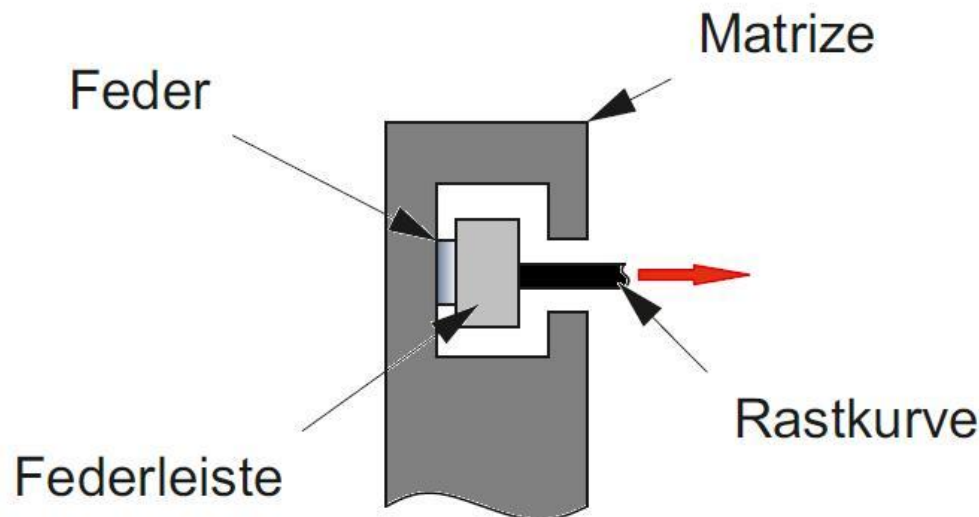


Abbildung 4.7: Prinzip Skizze zur Funktionsweise der Federleiste

Nachdem allerdings beim ersten Einbau der Leiste einige Unstimmigkeiten der Matrize aus dem Ersatzteilelager mit der technischen Zeichnung festgestellt wurden, wurde beim zweiten Einbau der Matrize mit der federnden Leiste, der Leiste noch zusätzlich eine T-förmige Stufe eingefräst, wodurch die Rastkurven kräftiger in die gewünschte Position geschoben wurden. Dadurch, dass das Spiel für die Rastkurve zu stark weggenommen wurde, kam es ab und an dazu, dass die Rastkurve zunächst auf der Matrize, statt auf der Folie aufgesetzt hat. Erst beim Verfahren in die Schweißposition hat die Rastkurve dann auf der Folie aufgesetzt. Aus diesem Grund wurde die Leiterfolie in den Fällen, wo die Rastkurve nicht auf der Leiterfolie auflag nicht mehr durch die Rastkurve in Position gehalten. Deshalb kam es dazu, dass während der bereits am anderen Ende der Leiterfolie verschweißte Träger vorgefahren ist, die Leiterfolie aus den Saugnäpfen der Matrize rausgerissen wurde. Durch eine intensivere Behandlung dieses kleinen Problems und Anpassung der Prozessglieder seitens der Mitarbeiter der Firma Leopold Kostal speziell auf die modifizierte Matrize mit der federnden Leiste, wäre definitiv gewährleistet, dass der Prozess in seiner Gesamtheit fehlerfrei abläuft. Allerdings sollten keine zu starken Veränderungen an der Anlage durchgeführt werden, um jederzeit wieder auf den ursprünglichen Zustand umbauen zu können. Stattdessen wurde die federnde Leiste für einen erneuten Einbau verändert. Es wurde die T-förmige Fase in der Leiste niedriger gefräst, um somit weniger Schub zu erzeugen. Obwohl dann beim anschließenden Testlauf der Prozess auch fehlerfrei ablief, ließ sich keine aussagekräftige Verbesserung zum ursprünglichen Stand feststellen. Nichtsdestotrotz war die Konstruktion vor dem verkleinern der T-förmigen Fase in der Lage zehn gute Teile zu produzieren. Diese zehn Bauteile wurden dann für den Peeltest präpariert und vermessen. Die ermittelten Werte aus dem Testlauf mit der höchsten T-förmigen Fase, wurden anschließend als statistische Grundlage für eine Monte-Carlo-Simulation verwendet. Aufgrund der

Tatsache, dass alle vorherigen Messungen durch eine stetige Normalverteilungskurve angepasst werden konnten, wurden die Daten der Monte-Carlo-Simulation auch normalverteilt berechnet. Damit sich die Ergebnisse mit dem vorherigen Stand des Prozesses vergleichen lassen, werden in der Abbildung 4.8 die beiden Stände in Histogramme und Box-Plot Diagramme abgebildet. Dieser Auszug aus der statistischen Software JMP ist als die deterministische Berechnung, welche in Abschnitt 2.3.4. als ein Element der Monte-Carlo-Simulation vorgestellt wurde anzusehen.

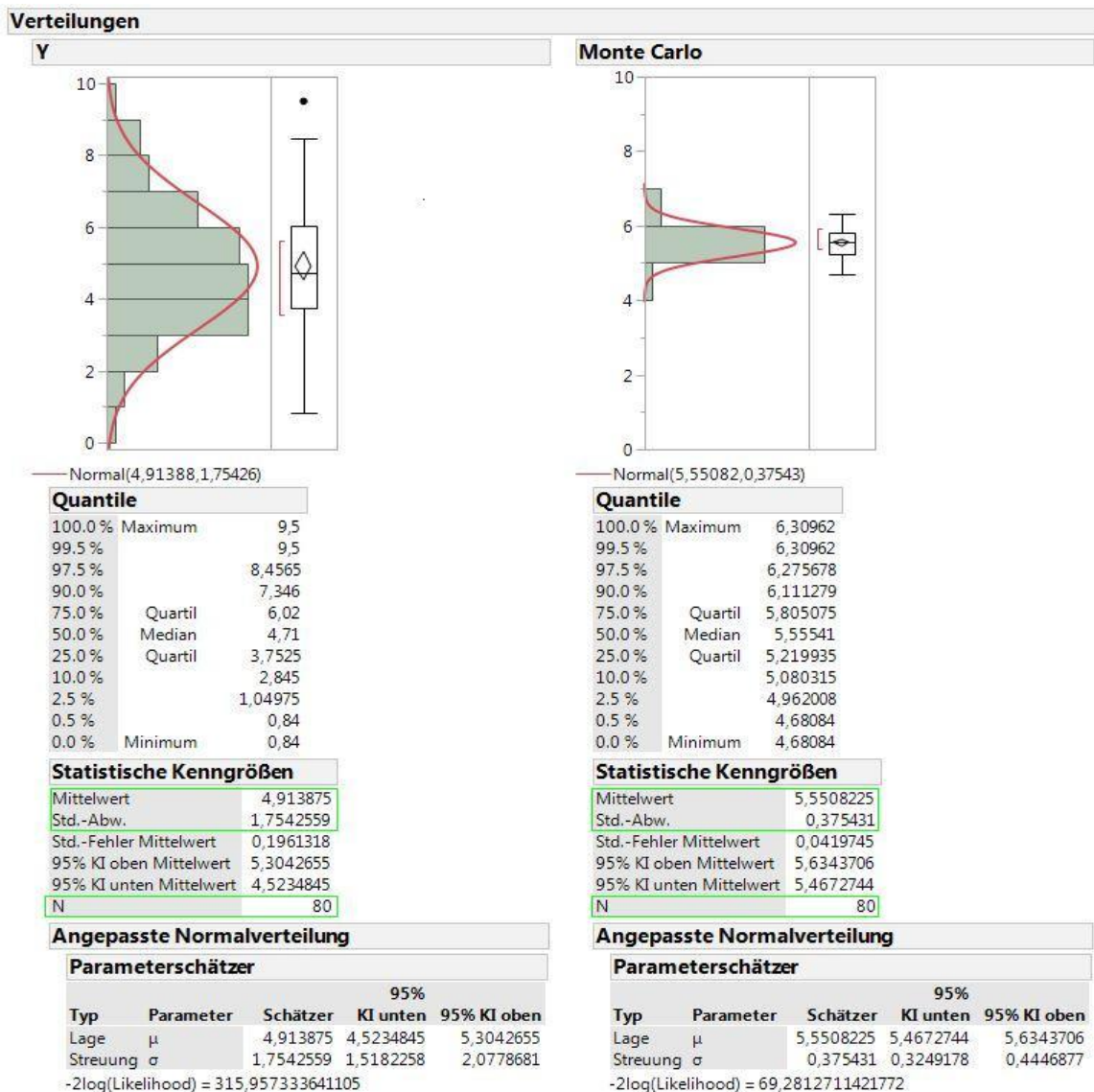


Abbildung 4.8: Verteilungen vor und nach dem Einbau der Federleiste mit stetiger Normalverteilungsanpassung

In diesem Fall lässt sich also die Monte-Carlo-Simulation sehr gut dazu nutzen, die Prozesstendenz zu berechnen, um den neuen Stand mit dem ursprünglichen Stand des Prozesses zu vergleichen. Dazu wurde aus den zehn Daten der statistische Charakter, also der Mittelwert und die Standardabweichung entnommen und anhand dieser dann insgesamt 80 Zufallszahlen berechnet. Somit lassen sich die Werte aus der Monte-

Carlo-Simulation mit den vorher ermittelten 80 Werten, welche in Abbildung 4.3 in einer Einzelwertkarte aufgetragen wurden, sehr gut verglichen. In Abbildung 4.8 sind zum einen die beiden Histogramme mit den dazugehörigen Box-Plots und zum anderen die grün eingerahmten Werte von entscheidender Bedeutung. Die Achsen der Histogramme sind bewusst gleich skaliert, sodass sie sich leichter vergleichen lassen. Es lässt sich entnehmen, dass die Werte mit der neuen Federleiste, nur noch um einen sehr kleinen Bereich streuen, was von einem sehr stabilen Prozess zeugt. Diese Erkenntnis bestätigen auch die Standardabweichungen der verschiedenen Prozesszustände. Durch die Federleiste liegt eine mehr als vierfach geringere Streuung der Werte vor. Außerdem wurde der Mittelwert um einen geringen Betrag erhöht, was auch die Verbesserung des Prozesses bestätigt.

Des Weiteren stellt Abbildung 4.9 einen Vergleich zwischen den Ergebnissen aus der Monte-Carlo-Simulation dar, wenn ausgehend von den zehn gemessenen Werten, 80, 160 und 320 Zufallszahlen ermittelt werden. Alle Histogramme haben somit die gleiche Ausgangslage mit Hinblick auf Mittelwert und Standardabweichung. Es lässt sich jedoch eindeutig entnehmen, dass mit steigender Anzahl an Zufallszahlen, die Ergebnisse immer genauer werden und immer besser durch eine Normalverteilung approximiert werden können. Diese Abbildung bestätigt die Aussage der Gleichung (2.3) mit Hinblick auf die Stichprobengröße. Die Abbildung 4.9 zeigt, dass eine größere Stichprobengröße für mehr Genauigkeit sorgt. In der Realität muss also für jede Aufgabe einzeln geprüft werden, wie groß der Stichprobenumfang sein soll. So gilt: die Stichprobengröße sollte so groß wie möglich, aber so klein wie nötig gewählt werden. Auf der einen Seite steigen bei einer zu großen Stichprobengröße der Aufwand und die Kosten für das Unternehmen. Auf der anderen Seite bieten größere Stichprobengrößen auch genauere Ergebnisse.

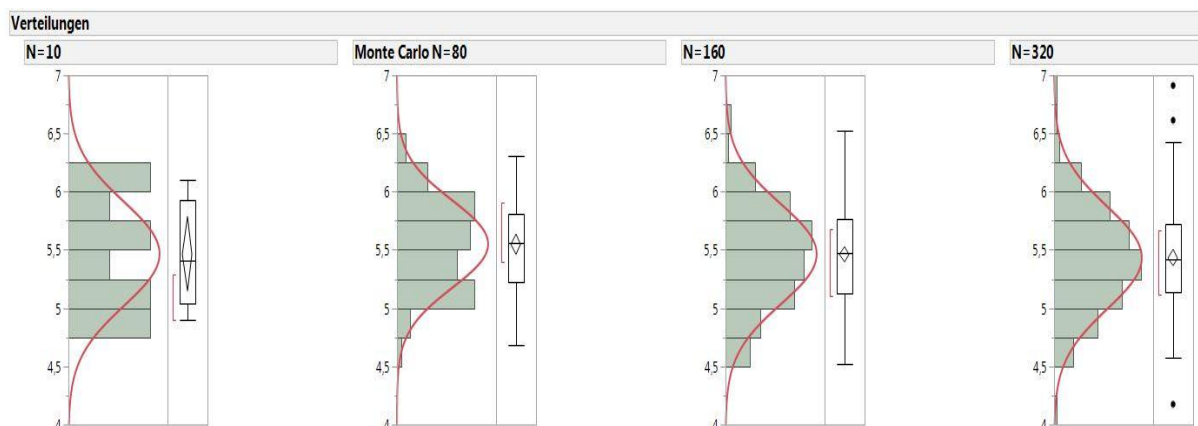


Abbildung 4.9: Monte-Carlo-Simulationen mit unterschiedlichen Datengrößen

In diesem Abschnitt 4.4. wurde vorgestellt, wie der DMAIC-Zyklus von Six Sigma durch eine Monte-Carlo-Simulation unterstützt werden kann, um bei der Lösung des Problems der Ultraschallschweißanlage Abhilfe zu schaffen. Bevor im nächsten Abschnitt die Kontrollkarte des Prozesses mit den zwei Phasen (vor und nach dem Einbau der Federleiste) vorgestellt wird, ist es wichtig an dieser Stelle für weiterführende Untersuchungen allgemein festzuhalten, wie die Simulation in den DMAIC-Zyklus von Six Sigma integriert werden kann.

Eine Monte-Carlo-Simulation in Zusammenhang mit dem DMAIC-Zyklus von Six Sigma kann immer benutzt werden, falls zu wenig Daten eines Prozesses vorliegen. Das Problem bei zu wenigen Daten ist, dass dadurch die statistische Aussagefähigkeit der Daten nicht gegeben ist. Dieses Problem kann vorliegen, wenn z.B. lediglich alte Messwerte eines noch laufenden Prozesses vorliegen, wenn die Ermittlung der Daten nicht mehr möglich ist, weil z.B. die Anlage nicht mehr aktiv eingesetzt wird oder aber auch aus dem Grund, dass die Stichprobenermittlung sehr zeitintensiv und dadurch kostenaufwändig ist. Auf diese Weise lassen sich dann in den oben genannten Fällen auf schnellstem Wege, repräsentative und beliebig viele Zufallszahlen generieren. Dadurch ist gewährleistet, dass wie bereits in Gleichung 2.3 und in Abbildung 4.9 angedeutet wurde, durch eine größere Anzahl an Zufallswerten die Genauigkeit und Aussagekräftigkeit des Ergebnisses ansteigt. Der Vorteil hierbei im Gegensatz zur aktiven Ermittlung der Stichprobenwerte aus dem laufenden Prozess ist, dass beispielweise bei einer zerstörenden Prüfung wie z.B. bei dem Peeltest, die Bauteilkosten erspart werden. Ferner kann die Zeit zur Probenpräparation auch für die Analyse der Daten verwendet werden, wodurch im Endeffekt auch Betriebszeit gespart wird. Dadurch, dass heutzutage auch viele Statistik Softwaresysteme Monte-Carlo-Simulationen zur Generierung von Zufallszahlen anbieten, ist es also auch für einen Menschen mit wenig Erfahrung aus dem Simulationsumfeld möglich, auf diese Weise mit simulierten Werten zu rechnen. Der Vorteil ist, dass eine einzige Software dazu genutzt werden kann und dadurch teure Lizenzen für verschiedene Softwares ebenfalls erspart bleiben.

Dabei sollte allerdings beachtet werden, dass Zufallszahlen in diesem Fall benutzt werden können, da zum einen systematische Effekte durch die Kontrollkarte in Abbildung 4.3 und zum anderen ein signifikanter Einfluss der Variablen LED und Nest durch die ANOVA, dargestellt in der Abbildung 4.4, ausgeschlossen wurden. Es wurde also eine rein statistische Untersuchung zum Vergleichen der unterschiedlichen Stände des Prozesses, anhand der Werte durchgeführt. Es muss also festgehalten werden, dass bei systematischen Symptomen dieser Weg der Zufallszahlgenerierung nicht genutzt werden kann, da oftmals wiederkehrende Effekte nicht durch statistische Kennzahlen aufgefasst werden können. Ein sehr einfaches Beispiel zur Verdeutlichung, dass statistische Kennzahlen nicht immer dieselbe Information liefern,

wie die graphischen Darstellungen, wird in [TK09] vorgestellt. In diesem Fall geht es darum, dass vier verschiedene Abbildungen zwar denselben Korrelationskoeffizienten bestimmen, welcher eine statistische Kenngröße ist, was an dieser Stelle nicht geklärt werden muss, jedoch die Verläufe ganz unterschiedlich sind und auf systematische Effekte zurückschließen lassen.

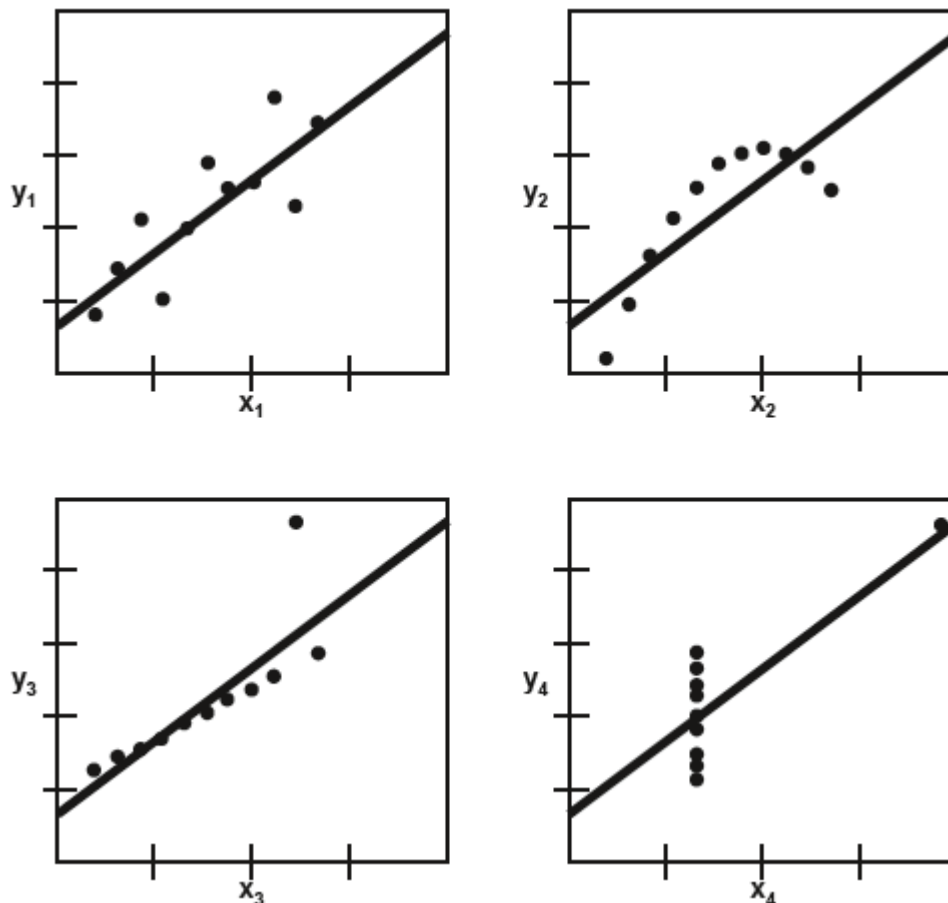


Abbildung 4.10: Regressionsplots mit gleichen Korrelationskoeffizienten

Die Allgemeingültigkeit dieses Konzepts besteht also darin, dass bereits in der Measure Phase oder später während der Improve Phase einer Untersuchung, die Ermittlung von Daten auf eine kleine Anzahl beschränkt werden kann, um somit Kosten und Aufwand zu sparen. Die fehlenden Daten können anschließend aus dem statistischen Charakter der bereits ermittelten Werte, mithilfe der Monte-Carlo-Simulation generiert und zur weiteren Verwendung benutzt werden. Entscheidend für diesen Schritt ist es, dass ein vorhandener Fehler nicht systematisch auftreten darf sondern sporadisch vorkommen muss. Außerdem muss das Messsystem bereits einer Messsystemanalyse unterzogen worden sein, damit die Zufallszahlen nicht auf Basis von verfälschten Werten generiert werden. Der nächste Abschnitt befasst sich im Anschluss mit dem Vergleich zwischen dem ursprünglichen Zustand und dem Zustand des Prozesses, nach dem Einbau der Federleiste.

4.5. Control Phase

In dem vorherigen Abschnitt wurde ein Ansatz vorgestellt, wie das Problem der Ultraschallverschweißung behoben werden kann. Anschließend wurde die Monte-Carlo-Simulation in der Improve Phase implementiert um basierend auf einer stetigen Anpassung, mehr statistische Sicherheit zu erlangen und die Verbesserung zu beweisen. In diesem Abschnitt wird der neue Stand der Anlage als Kontrollkarte vorgestellt. Dieser Schritt ist nötig um mit der Kontrollkarte eine weitere übersichtliche Darstellung der verschiedenen Zustände zu betrachten.

In Abbildung 4.11 wird eine Einzelwertkarte vorgestellt. Die Kontrollkarte ist in zwei Phasen aufgeteilt. Die erste Phase ist im Prinzip identisch mit der Kontrollkarte aus Abbildung 4.3 und wird aus den 80 Messdaten des Prozesses vor dem Einbau der Federleiste gebildet. Die zweite Phase bilden die insgesamt 80 berechneten Werte aus der Monte-Carlo-Simulation, welche auf zehn Werte aus dem neuen Stand der Anlage nach dem Einbau der Federleiste basieren.

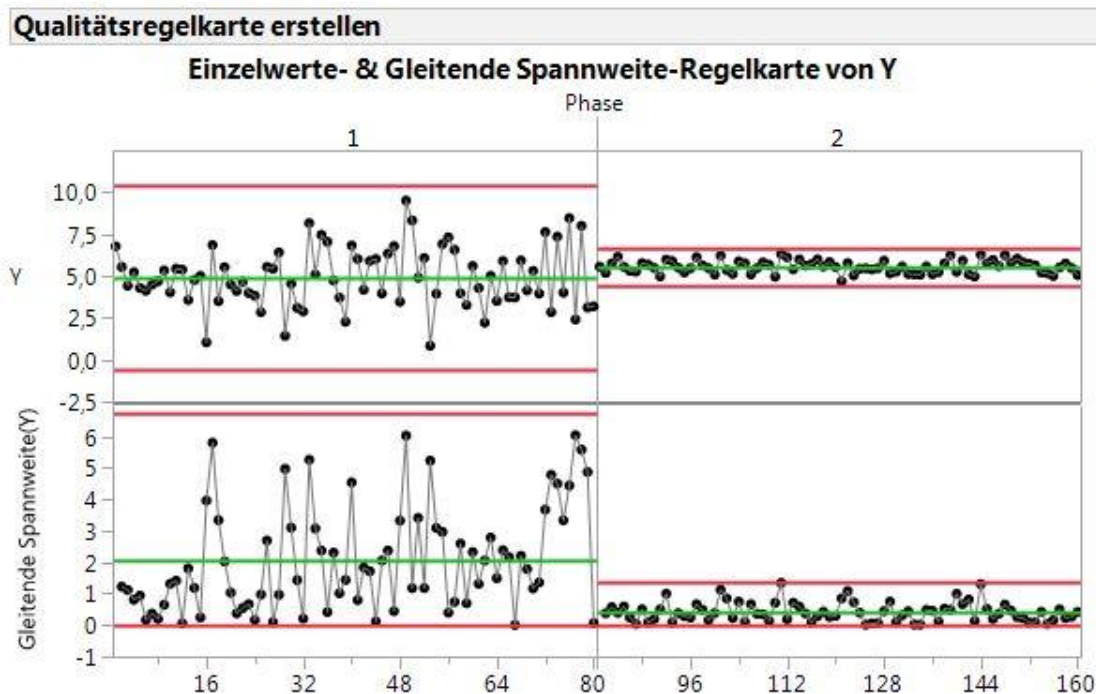


Abbildung 4.11: Qualitätsregelkarte mit 2 Phasen

Aus der obigen Abbildung ist eindeutig ersichtlich, dass die zweite Phase eine sehr geringe Streuung aufweist. Ebenfalls lässt sich entnehmen, dass der Mittelwert (grüne Linie in der oberen Hälfte) geringfügig angehoben wurde. Dabei beschreibt die y-Achse erneut die Peelkräfte in Newton und die x-Achse die Teilenummern. Der Prozess muss in der weiteren Zeit immer wieder beobachtet und die Kontrollkarte mit echten Werten aktualisiert werden, um beispielsweise eine Verschiebung des Mittelwerts oder eine Veränderung in der Standardabweichung frühzeitig zu erkennen

um wichtige Maßnahmen zu ergreifen. Die Berechnung des Sigma Wertes oder eines Prozessfähigkeitsindizes, wird an dieser Stelle nicht mehr durchgenommen, da diese optisch sichtbare Verbesserung, statistisch nicht weiter nachgewiesen werden muss. Für den weiteren Gebrauch der Vormontageanlage empfiehlt es sich, das Testpersonal, welche die attributive Beurteilung durchführt, noch einmal zu Schulen, um eine höhere Wiederhol- und Vergleichspräzision zu erzielen. Ist dies gewährleistet, empfiehlt es sich den Prozess zunächst weiterhin in einem vier-stündlichen Zyklus zu beobachten. Sollten Schwankungen in der Schweißqualität festgestellt werden, empfiehlt es sich, zunächst die Prozessabläufe zu betrachten, um Einflüsse von vorherigen Prozessschritten ausschließen zu können. Läuft der Prozess bis zum Ultraschallschweißen stabil ab, ist es sinnvoll reproduzierbare Feineinstellungen durchzuführen, um jederzeit auf den ursprünglichen Stand zurückkehren zu können. In vielen Fällen sollte somit Abhilfe geschaffen sein.

Somit wäre ein stabiler Prozess gewährleistet, der eine viel geringere Streuung aufweist, wodurch die schwankenden Schweißergebnisse behoben wären. Des Weiteren wurde gezeigt, inwiefern eine Monte-Carlo-Simulation in den DMAIC-Zyklus integriert werden kann, um eine Schwäche von Six Sigma zu beseitigen.

5. Zusammenfassung

Am Ende dieser Arbeit lässt es sich zusammenfassend sagen, dass zunächst die Abläufe mit ihren Unterprozessen in der Vormontageanlage vorgestellt wurden, wo auch der Ultraschallschweißprozess stattfindet. Dafür wurden die Prozesszusammenhänge mithilfe eines Flussdiagramms übersichtlich dargestellt. Anschließend wurde in Abschnitt 2.2. der DMAIC-Zyklus von Six Sigma vorgestellt. Dabei wurde jede Phase des DMAIC-Zyklus in einem eigenen Abschnitt, mit ihren typischen Tools präsentiert. Ferner wurde auch begründet, warum lediglich der DMAIC-Zyklus von Six Sigma in Frage kommt und nicht etwa das DFSS Verfahren. Anschließend wurden zunächst wichtige Begriffe wie z.B. System und Modell, die im Zusammenhang mit der Simulation stehen geklärt. Drei wichtige Simulationsverfahren wurden sonderlich betrachtet. Darunter die kontinuierliche, die ereignisdiskrete und die Monte-Carlo-Simulation. Die jeweiligen Anwendungsgebiete wurden gezeigt.

Im Hauptteil wurde dann diskutiert, in welchem Sinne die zuvor vorgestellten Simulationsverfahren in den DMAIC-Zyklus integriert werden können. Das am meisten geeignete Simulationsverfahren für die Integration in den DMAIC-Zyklus, um den Ultraschallschweißprozess zu verbessern, wurde anschließend als die Monte-Carlo-Simulation herausgestellt. Für die ereignisdiskrete und kontinuierliche Simulation wurden ebenfalls geeignete Anwendungsgebiete vorgeschlagen. Die Vor- und Nachteile wurden jeweils diskutiert.

Anhand dieser Erkenntnis wurden dann in der praktischen Hälfte des Hauptteils, die einzelnen Phasen des DMAIC-Zyklus nacheinander durchlaufen und die phasenspezifischen, statistischen Tools wurden angewendet, bis schließlich in der Improve Phase eine Monte-Carlo-Simulation dazu genutzt wurde fehlende Daten auszuweiten und um mehr statistische Sicherheit für die Erkenntnisse zu erlangen. Zur Verbesserung des Ultraschallschweißprozesses hatte sich herausgestellt, dass die Rastkurven beim Ablegen auf der Folie nicht ausreichend genug geführt werden und zu viel Spiel haben. Deswegen musste ein Werkzeug in der Anlage modifiziert werden. Dafür wurde mithilfe einer Federleiste das Spiel eingegrenzt, wodurch der Prozess reproduzierbarer gemacht wurde. Die Verbesserung des Ultraschallschweißprozesses wurde anschließend anhand von statistischen Werkzeugen wie z.B. Histogramme mit Box-Plots und Qualitätsregelkarten bewiesen.

Somit wurde in dieser Arbeit gezeigt, wie sich Simulationsmethoden in das Arbeitsumfeld von Six Sigma eingliedern lassen. Es hat sich als eine geeignete und lukrative Zusammenarbeit erwiesen und macht somit Hoffnung auf weitergehende Untersuchungen. Nachfolgende Untersuchungen sollten versuchen, beispielsweise ein digitales Abbild von Prozessen zu erschaffen, an denen dann direkt die Six Sigma

Untersuchungen durchgeführt werden könnten, ohne viel Prozesserfahrung zu besitzen. Des Weiteren bietet es sich für die Six Sigma Untersuchung an, viele ihrer analogen Tools mithilfe einer Simulation digitalisiert zu benutzen. Darunter gehören beispielsweise Flussdiagramme, die somit viel übersichtlicher werden.

Des Weiteren sollten weiterführende Untersuchungen die vorgeschlagenen Integrationsmöglichkeiten für die kontinuierliche und ereignisdiskrete Simulation verwirklichen. Außerdem sollte untersucht werden, welche Ergebnisse das vorgestellte Konzept zur Integration von einer Monte-Carlo-Simulation in Six Sigma, bei verschiedenen anderen Problemstellungen liefert. Interessant wäre es hierbei zu untersuchen, ob signifikante Faktoren, nach einer mithilfe von einer Monte-Carlo-Simulation untersuchten Studie, auch als solche identifiziert werden können.

6. Literaturverzeichnis

- [BCNN10]: Banks, Jerry; Carson II, John S.; Nelson, Barry L.; Nicol, David M.: Discrete-Event System Simulation, Fifth Edition. Essex:Pearson Prentice Hall, 2010
- [BXZGTB16]: Bai, Xin; Xie, Liyang; Zhang, Ruijin; Guan, Ruoyi; Tong, Anshi; Bai, Enjun: Measurement and estimation of probabilistic fatigue limits using Monte-Carlo simulations. International Journal of Fatigue 95 (2017) 229–235. Available online 2. November 2016.
- [Cell92]: Cellier, Francois E.: Simulationstechnik II, Behandlung diskreter und gemischt kontinuierlich/diskreter Systeme. Vorlesungsskript, 1992
- [CTKSKÖ16]: Çelik, Sezai; Taner, Mehmet Tolga; Kağan, Gamze; Şimşek, Masum; Kağan, Mehmet Kemal; Öztekin, İbrahim: A Retrospective Study of Six Sigma Methodology to Reduce Inoperability among Lung Cancer Patients. 5th International Conference on Leadership, Technology, Innovation and Business Management. Procedia - Social and Behavioral Sciences 229 (2016) 22 – 32
- [EA06]: El-Haik, Basem; Al-Aomar, Raid: Simulation-Based Lean Six-Sigma and Design for Six- Sigma. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006
- [EST]: Dr. Warschat, Joachim, Dipl.-Ing. Wagner, Frank: Einführung in die Simulationstechnik
- [FMM05]: Ferrin, David M.; Miller, Martin J.; Muthler, David: LEAN SIGMA AND SIMULATION, SO WHAT'S THE CORRELATION? V2. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, pp. 2011-2015
- [FSDVKHAM15]: Falter, Daniela; Schröter, Kai; Dung, Nguyen Viet; Vorogushyn, Sergiy; Kreibich, Heidi; Hundecha, Yeshewatesfa; Apel, Heiko; Merz, Bruno: Spatially coherent flood risk assessment based on long-term continuous simulation with a coupled model chain. Journal of Hydrology 524 (2015) 182–193. Available online 16. February 2015.
- [GDW10]: Gygi, Craig; DeCarlo, Neil; Williams, Bruce: Six Sigma für Dummies – Analysieren, verbessern, kontrollieren und damit Erfolge erzielen, 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010

- [GJ15] Gundlach, Carsten; Jochem, Roland (Hrsg.): Praxishandbuch Six Sigma – Fehler vermeiden, Prozesse verbessern, Kosten senken, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Düsseldorf: Symposion Publishing GmbH, 2015
- [KLN16]: Ultraschallschweißen. Copyright © 2016 KLN Ultraschall AG, letzter Zugriff am 08. November 2016 <http://www.kln.de/de/verfahrensbeschreibungen/ultraschallschweissen>
- [Kostal]: <http://www.kostal.de/>, 2010 Leopold Kostal GmbH & Co. KG (letzter Zugriff 01.11.2016)
- [LAW15]: Law, Averill: Simulation Modeling and Analysis, fifth edition. New York: McGraw-Hill Education, 2015
- [Nahr15]: Nahrstedt, Harald: Die Monte-Carlo-Methode, essentials. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015
- [Plate16]: Prof. Plate, Jürgen: Einführung in Surface Mounted Devices (SMD). Hochschule München, Letzte Aktualisierung: 09/24/2016 11:11:24 <http://www.netzmafia.de/skripten/hardware/SMD/>
- [RFSRESTM16]: Reichenberger, Michael A.; Fronk, Ryan G.; Shultis, J. Kenneth; Roberts, Jeremy A.; Edwards, Nathaniel S.; Stevenson, Sarah R.; Tiner, Christopher N.; McGregor, Douglas S.: Monte Carlo simulation of random, porous (foam) structures for neutron detection. Radiation Physics and Chemistry 130 (2017) 186–195. Available online 28. August 2016
- [SBH10]: Siebertz, Karl; van Bebber, David; Hochkirchen, Thomas: Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [Schlundt13]: Schlundt, Johannes: Schriftliche Ausarbeitung zum Vortrag Monte-Carlo-Simulation. Universität Hamburg Fachbereich Informatik, 2013
- [SH05]: Sabuncuoglu, Ihsan; Hatip, Ahmet: “The Turkish Army Uses Simulation to Model and Optimize Its Fuel-Supply System”. Interfaces: <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/inte.1050.0173?journalCode=inte> (letzter Zugriff auf Abstract 30.11.2016), November-Dezember 2005
- [SHBMMR13]: Staudter, Christian; von Hugo, Clemens; Bosselmann, Philipp; Mollenhauer, Jens-Peter; Meran, Renata; Roenpage, Olin: Design for Six Sigma+Lean Toolset - Innovationen erfolgreich realisieren, 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013

- [SSBB16]: rolosixmelch (Nickname): Wertstromanalyse – Wertstromdesign – value stream mapping. <http://www.sixsigmablackbelt.de/wertstromanalyse-value-stream-mapping/>, veröffentlicht am 26. Mai 2016, letzter Zugriff am 15. November 2016
- [SSM]: Prof. Dr. Weihs, Carsten: Six Sigma Methoden Vorlesungsskript. TU Dortmund: 2015
- [ST70]: Schmidt, Joseph W.; Taylor, Robert E.: Simulation and Analysis of Industrial Systems. Illinois: Richard D. Irwin, INC., 1970
- [TK09]: Toutenburg, Helge; Knöfel, Phillip: Six Sigma – Methoden und Statistik für die Praxis, Zweite verbesserte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2009
- [Topf07]: Töpfer, Armin (Hrsg.): Six Sigma - Konzeption und Erfolgsbeispiele für praktizierte Null-Fehler-Qualität, Vierte, aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- [UMNO15]: Uriarte, Ainhoa Goienetxea; Moris, Matías Urenda; Ng, Amos H.C.; Oscarsson, Jan: LEAN, SIMULATION AND OPTIMIZATION: A WIN-WIN COMBINATION. Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference, pp. 2227-2238
- [WH09]: Weckheuer, Klaus; Hennes, Michael: Erfolgreiche Weiterentwicklung des Six Sigma-Konzeptes zu Lean Six Sigma in einem Unternehmen der chemischen Industrie, in Lean Six Sigma - Erfolgreiche Kombination von Lean Management, Six Sigma und Design for Six Sigma. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009

Eidesstattliche Versicherung