



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Identifikation und Bewertung von Möglichkeiten zur Automatisierung des Prozesses Schrauben am Beispiel der Automatisierung des Arbeitsschrittes "Kurbelgehäuse zusammenschrauben" bei einem Motorradhersteller

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Kurt Matyas

(E300 - Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften)

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dipl.Ök. Jan Henjes

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Produktions- und
Logistikmanagement, Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Philipp Hofmann

0925769 (066 482)

Ringstraße 2

5280 Braunau

Wien, im Februar 2015

Philipp Hofmann



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Februar 2015

Hofmann Philipp

Danksagung

Eine Abschlussarbeit schreibt sich nicht von alleine, weshalb ich mich an dieser Stelle nachdrücklich bei allen Unterstützern und Helfern bedanken möchte. Diese Diplomarbeit soll meinen Eltern gewidmet sein, da sie nicht nur mein Studium zum größten Teil finanziert haben, sondern auch ständig ein sehr großes Interesse an meiner Arbeit zeigten und mich so gut es ging unterstützten.

Aus meinem Freundeskreis danke ich Max, Markus, Johannes und Michael für starken Rückhalt über die gesamte Dauer meines Studiums und die vielen wichtigen, interessanten Debatten, Hinweise und intensiven Diskussionen.

Weiters möchte ich mich bei der Firma KTM dafür bedanken, dass ich dort im Rahmen eines Praktikums den Praxisteil meiner Arbeit anfertigen konnte. Spezieller Dank gilt meinem dortigen Betreuer Dipl. - Ing. (FH) Klingsberger Roman, der mich jederzeit unterstützte und immer ein offenes Ohr hatte.

Darüber hinaus möchte ich mich auch bei meinem Betreuer Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dipl.-Ök. Henjes Jan für die geduldige und sehr gute Begleitung über den Arbeitsverlauf bedanken.

Kurzfassung

Eine höherer Automatisierungsgrad einer Montage am Fließband wird oftmals mit höherer Produktivität, kürzerer Taktzeit und einer Kostensenkung gleichgesetzt. Diese Effekte gehen zwar tatsächlich häufig mit einer Fertigungsautomatisierung einher, falsch umgesetzt kann eine Automatisierung allerdings auch gegenteilige Entwicklungen verursachen. Als komplexer und besonders häufig vorkommender Prozess in der Fertigung stellt das Schrauben eine besondere Herausforderung bezüglich Automatisierung dar. Daraus ergibt sich die Forderung nach regelmäßiger Optimierung dieser Prozesse. Das klassische Verfahren der Investitionsrechnung setzt nicht nur die Kenntnis einer Vielzahl von Daten und Annahmen voraus, sondern verursacht auch einen erheblichen zeitlichen Aufwand. Trotzdem werden wichtige Faktoren, wie individuelle Gegebenheiten an den einzelnen Arbeitsplätzen und der Montagelinie insgesamt, nicht berücksichtigt.

In dieser Diplomarbeit wird eine Methodik entwickelt, die es erlaubt Arbeitsplätze in einer Fließfertigungslinie mit Taktzeit im niedrigen Minutenbereich zu analysieren und bezüglich des Potentials Schraubprozesse zu automatisieren zu beurteilen. Durch die schlanke Kalkulation wird der Zeitaufwand gering gehalten. Zusätzlich führt der klar vorgegebene Entscheidungsweg und eine Identifikation und Bewertung von Einflussfaktoren dazu, dass die Sinnhaftigkeit einer automatisierten Verschraubung eindeutig ermittelt werden kann.

Nach der Erläuterung der theoretischen Grundlagen werden Einflussfaktoren auf eine Automatisierung des Prozesses "Schrauben" ermittelt. Darauf aufbauend wird eine Methodik entwickelt, die den gestellten Anforderungen genügt. Anschließend wird die Praxistauglichkeit ermittelt. Dafür wurde eine reale Fließfertigungslinie untersucht.

Abstract

A higher level of automation of an assembly in the line production is often supposed to cause higher productivity, shorter cycle time and cost reduction. In fact these effects do often occur, incorrect implementation of automation however can lead to contrary results. As a complex and frequently used process in the assembly screwing presents a special challenge. This causes the demand of constant optimizing of these processes. The classic form of the investment statement requests not just the knowledge of a lot of data and assumptions, but also consumes a lot of time. However, important factors, like individual circumstances, are not considered.

In this thesis a method is developed, which allows to analyze and evaluate workspaces at an assembly line with low cycle time regarding the potential to automating screwing-processes. The slim calculation causes a low expenditure of time. A clear decision-making process and the identification and integration of specific influence-factors lead to a distinct judgement of the usefulness of an automation.

After the explanation of the theoretical background, the thesis deals with the fundamental influence-factors for the usefulness of automating screwing-processes. Built on these factors a methodology of decision-making is developed, which meets all requirements. In order to test the suitability for commonly use of this methodology of decision-making, it is accordingly applied to a real-world example.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Zielsetzung	7
1.2	Rahmenbedingungen.....	7
1.3	Aufbau der Arbeit.....	8
2	Fließfertigung	9
2.1	Niveau der Fertigung	10
2.1.1	Manuelle Fertigung	10
2.1.2	Mechanisierte Fertigung	11
2.1.3	Automatisierte Fertigung.....	11
2.2	Fertigungskosten	11
2.3	Fertigungsoptimierung	15
2.4	Investitionsrechnung	16
2.4.1	Die statische Methode	16
2.4.2	Die dynamische Methode	17
2.5	MTM - Analyse.....	17
3	Automatisierung der Fertigung	19
3.1	Automatisierbarkeit von Prozessen.....	19
3.2	Flexibilität.....	20
3.3	Problem der Komplexität.....	21
3.4	Automatisierungsgrad.....	21
3.5	Ethik und Automatisierung	24
4	Die automatisierte Verschraubung	27
4.1	Die Schraubverbindung	27
4.1.1	Allgemein.....	27
4.1.2	Einflussfaktoren auf die Schraubverbindung	28
4.1.3	Anziehverfahren.....	28

4.1.4	Bedeutung von Schraubverbindungen hinsichtlich Automatisierung	29
4.2	<i>Komplexität und Flexibilität</i>	31
4.2.1	Komplexität	31
4.2.2	Flexibilität.....	32
4.3	<i>Technische Anforderungen an eine automatisierte Verschraubung bzw. an den Schraubautomaten</i>	33
4.4	<i>Komponenten eines Schraubroboters</i>	34
4.4.1	Schraubspindel	34
4.4.2	Der Roboter	35
4.4.3	Steuerung	37
4.4.4	Automatisierte Schraubenzuführung.....	37
4.5	<i>Maßnahmen für einen störungsfreien Betrieb</i>	38
5	Vorgehensmodell zur Prozessoptimierung	40
5.1	<i>Zweck / Ziele</i>	40
5.2	<i>Randbedingungen des Modells</i>	40
5.3	<i>Einflussfaktoren</i>	41
5.3.1	Einflussfaktoren auf die Automatisierung im Allgemeinen	41
5.3.2	Einflussfaktoren auf die automatisierte Verschraubung im Speziellen.....	42
5.4	<i>Aufbau der Methodik</i>	47
5.5	<i>Abschnitt 1: Vorüberlegungen</i>	49
5.5.1	Handlungsablauf	52
5.5.2	Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen	55
5.5.3	Beispiel	55
5.6	<i>Abschnitt 2: Vorselektion</i>	56
5.6.1	Handlungsablauf	56
5.6.2	Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen	59
5.7	<i>Abschnitt 3: Automatisierungspotentialanalyse</i>	59
5.7.1	Einflussfaktoren	60
5.7.2	Gewichtungsfaktoren	64
5.7.3	Berechnungsformel für das Automatisierungspotential.....	65
5.7.4	Handlungsablauf.....	66

5.7.5	Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen	69
5.8	<i>Abschnitt 4: Lastenheft</i>	70
5.8.1	Handlungsablauf	70
5.8.2	Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen	72
5.9	<i>Abschnitt 5: Herstellkostenvergleich</i>	73
5.9.1	Handlungsablauf	75
5.9.2	Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen	76
5.9.3	Beispiel	77
5.10	<i>Abschnitt 6: Investitionsrechnung</i>	77
5.10.1	Handlungsablauf	77
5.10.2	Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen	78
6	Überprüfung der Entscheidungsmethodik	79
6.1	<i>Produktion von Motorradmotoren am Fließband</i>	79
6.1.1	Abschnitt 1	79
6.1.2	Abschnitt 2	81
6.1.3	Abschnitt 3	82
6.1.4	Abschnitt 4	87
6.1.5	Abschnitt 5	87
6.1.6	Abschnitt 6	91
7	Begleitende Excel-Tabellen	93
7.1	<i>Blatt 1: Vorüberlegungen</i>	93
7.2	<i>Blatt 2: Vorselektion</i>	94
7.3	<i>Blatt 3: Automatisierungspotentialanalyse</i>	95
7.4	<i>Blatt 4: Herstellungskostenvergleich</i>	96
7.5	<i>Blatt 5: Investitionsrechnung</i>	97
7.6	<i>Blatt 6: Hintergrundinformationen</i>	98
8	Zusammenfassung und Ausblick	99
8.1	<i>Zusammenfassung</i>	99
8.2	<i>Ausblick</i>	100

9	Literaturverzeichnis	102
10	Abbildungsverzeichnis	105
11	Formelverzeichnis	108
12	Tabellenverzeichnis	109
13	Abkürzungsverzeichnis	110
14	Anhang	112
14.1	<i>Messung der Positionsabweichungen</i>	<i>112</i>
14.2	<i>Standardarbeitsplan, Produktstrukturplan und MTM-Analyse</i>	<i>115</i>
14.3	<i>Fertigungskosten- und Investitionsrechnung</i>	<i>120</i>

1 Einleitung

Die Produktion spielt trotz eines anhaltenden Trends der De-Industrialisierung noch immer eine sehr wichtige Rolle. Neben den Arbeitsplätzen, die direkt im produzierenden Gewerbe vorzufinden sind, finden viele Menschen Jobs in Bereichen, die eng mit der Produktion verbunden sind. Dies sind vor allem Bereiche wie Logistik, Informationstechnik und Kommunikationstechnik. Deutschland konnte entgegen dem Trend den Industrieanteil zuletzt wieder erhöhen was stark dazu beigetragen hat, dass Deutschland gestärkt aus den Krisenjahren europäischer Wachstumsmotor ist. [1]

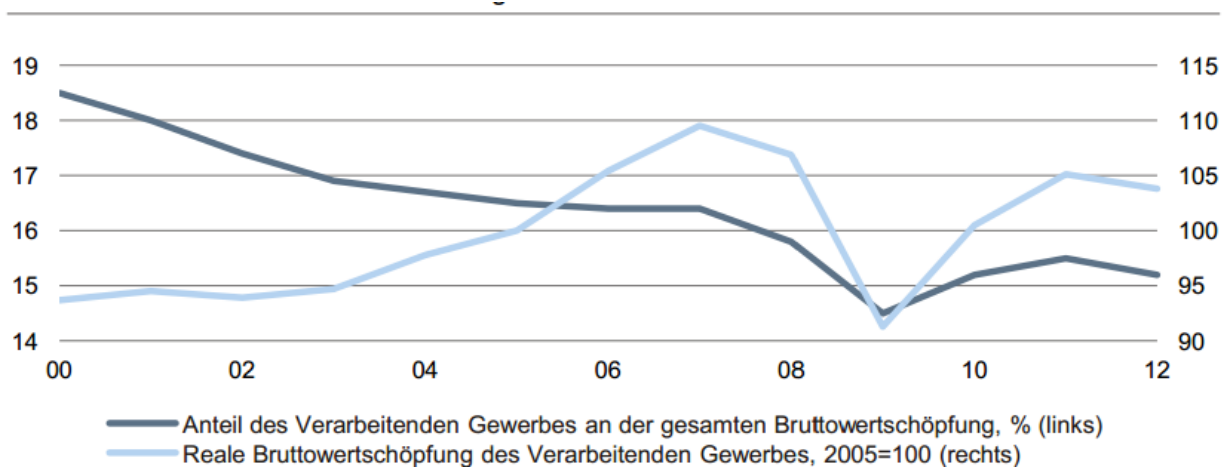


Abbildung 1.1 - Bedeutung der Produktion in der EU [2]

Wie hoch der Stellenwert der Produktion auch auf EU-Ebene ist, beweist das Ziel der EU den Industrieanteil von aktuell ca. 16% bis 2020 auf 20% zu erhöhen. [internet] Viele Faktoren, wie die Globalisierung, Ressourcenverknappung, Demografischer Wandel und immer kürzer werdende Produktlebenszyklen lassen dieses Ziel als unerreichbar, zumindest aber ambitioniert, erscheinen. Sollte die europäische Industrie aber in der Lage sein sich den Veränderungen nicht nur anzupassen, sondern diese auch aktiv mitzugestalten, wird dies langfristig positive Auswirkungen auf Produktionsstandorte in Europa haben. [1]

Im Zusammenhang mit der Erhaltung und Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit eines Produktionsunternehmens spricht man oft von einer Erhöhung des Automatisierungsgrades. Ob sich eine Automatisierung gewisser Bereiche in der Produktion aus wirtschaftlicher Sicht lohnt ist aber oft nicht so leicht zu beantworten. Der Trend zu kürzeren Produktlebenszyklen, kleineren Produktionslosen und eine

steigende Anzahl an Produktvarianten stellt die Produktionstechnik vor große Herausforderungen bei der Beantwortung dieser Frage. Zusätzlich erhöht der steigende Kostendruck die Notwendigkeit nach richtigen Entscheidungen, vor allem in den Hochlohnländern Europas. *Abbildung 1.2* stellt die Arbeitskosten im Verarbeitenden Gewerbe gegenüber. Die Werte schwanken dabei teilweise um mehr als den Faktor 15. Dies verdeutlicht, dass Fertigungsautomatisierung, vor allem in hochentwickelten Industriestaaten, eine bedeutende Rolle spielt. [1]

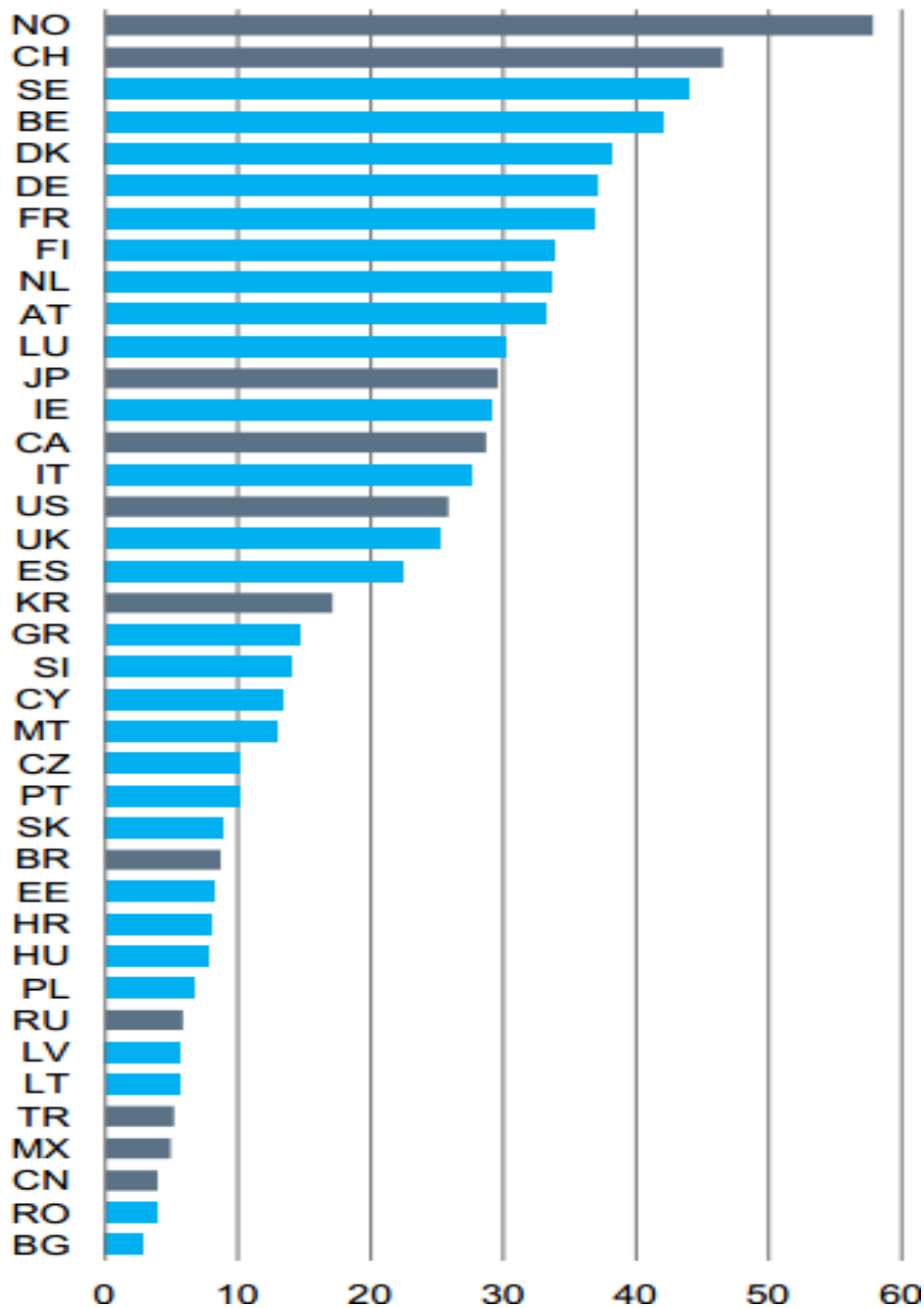


Abbildung 1.2 - Arbeitskosten im verarbeitenden Gewerbe in Euro je geleisteter Stunde (2012) [2]

Besonderes Augenmerk gilt dabei der in der Montage häufig vorkommenden Schraubtechnik. Die Demontagemöglichkeit, Wiederverwendbarkeit der Bauteile und die einfache Herstellung sind wesentliche Faktoren warum Schraubverbindungen häufig eingesetzt werden. Die verwendeten Schrauben spielen jedoch für die Herstellungskosten eines Produktes eine untergeordnete Rolle. Die Montagekosten machen meist den größten Teil der Kosten aus. Dies lässt erahnen wie wichtig ein optimal gestalteter Montageprozess ist. [3]

1.1 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es eine Methodik zu entwickeln, die es ermöglicht, die Sinnhaftigkeit der Automatisierung von Schraubprozessen in einer Fließbandmontage in wirtschaftlicher und technologischer Hinsicht zu beurteilen. Auf Basis von verschiedenen Einflussfaktoren sollen alle Stationen an der Montagelinie überprüft werden. Durch eine effiziente Vorgehensweise, d.h. dass anfangs nur wenige Daten benötigt werden und erst im Laufe der Methode der Informationsbedarf steigt, soll der Zeitaufwand gering gehalten werden. Dies und die sinnvolle und nachvollziehbare Vorgehensweise bei der Auswahl und Reihung der Arbeitsstationen der Montagelinie sollen die Vorteile dieser Methodik sein.

Ein produzierendes Unternehmen, dass diese Methodik anwendet, soll in der Lage sein den Bereich Fließfertigungslinie bezüglich der Möglichkeit automatisiert zu verschrauben überprüfen zu können.

1.2 Rahmenbedingungen

Oft ist die Bewertung, ob es sich lohnt automatisiert zu verschrauben, schwer. Es ist zu hinterfragen wie sinnvoll bzw. ob es überhaupt sinnvoll ist. Faktoren, wie neue Gesetze bezüglich Arbeitssicherheit, hohe psychische Belastung der Mitarbeiter durch Monotonie usw. spielen für einen Robotereinsatz in den Überlegungen eine Rolle. Die oftmals kleinen Produktionslose, vielfältige Produktvarianten und eine hohe Komplexität der Bauteile werfen nicht nur die Frage auf, ob eine Automatisierung der Schraubprozesse sinnvoll ist, sondern auch, wie diese im Detail

aussehen muss, um die geforderten Aufgaben effizient und effektiv ausführen zu können. Hauptaufgabe bei der Beurteilung ist die Beantwortung der Frage, ob sich eine Automatisierung der Schraubprozesse wirtschaftlich rentiert.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zuerst werden die zum Verständnis der Arbeit benötigten Grundlagen erläutert. Darauf aufbauend werden die Rahmenbedingungen für eine Entscheidungsmethodik dargelegt und in weiterer Folge die Einflussfaktoren, die für eine automatisierte Verschraubung von Bedeutung sind, bestimmt. Anschließend wird das Vorgehensmodell detailliert beschrieben. Dieses wird anschließend anhand eines Praxisbeispiels angewandt. Dazu wird eine reale Fließfertigungslinie der Entscheidungsmethodik unterzogen.

2 Fließfertigung

Grundsätzlich ist es das Ziel einer jeden Fertigung, egal in welcher Form, aus einem Input durch Einsatz von Ressourcen den gewünschten Output zu generieren wie in *Abbildung 2.1* zu sehen. Um dieses Ziel zu erreichen, gibt es zwei verschiedene Ansätze:

- Man versucht mit vorgegebenen Ressourcen den bestmöglichen Output zu schaffen
- Man will einen vorgegebenen Output erreichen und passt den Ressourceneinsatz entsprechend an

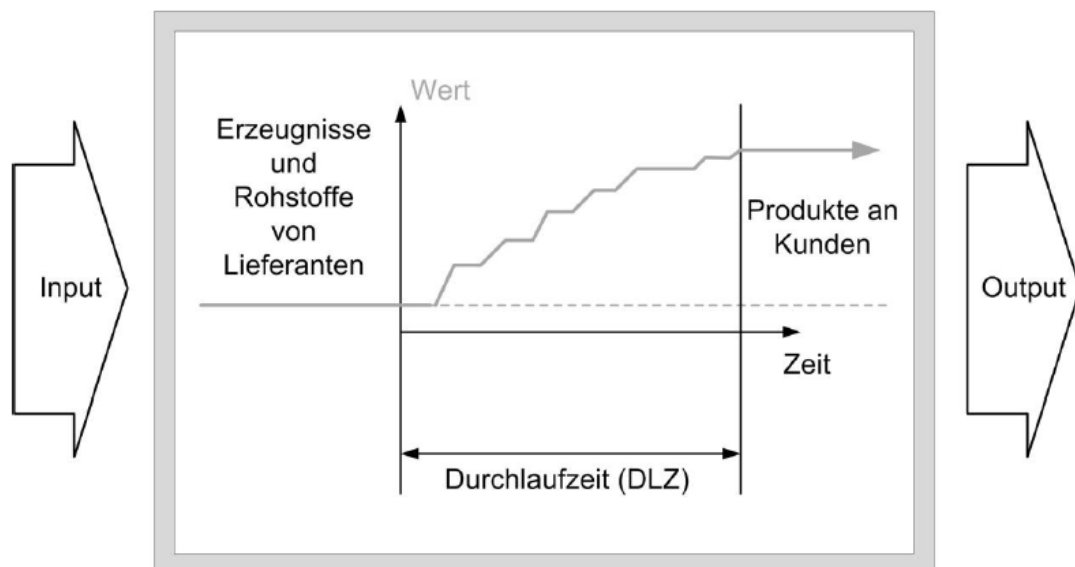


Abbildung 2.1 - Produktion als Wertschöpfungsprozess [4]

Unter den vielen Fertigungsarten stellt die Fließfertigung vor allem in der industriellen Produktion eine sehr wichtige Art dar. Mit ihrer Einführung durch Henry Ford im Jahr 1913 hat sich diese Art ein Produkt zu fertigen rasant entwickelt. Durch eine "*örtlich fortschreitende, zeitlich bestimmte und lückenlose Folge von technologischen Vorgängen der Produktfertigung*" [5, p. 870] ist es möglich eine hohe Stückzahl von Erzeugnissen wirtschaftlich zu produzieren. Es wird ein Herstellungsprozess in mehrere Subprozesse unterteilt, die wiederum aus mehreren Arbeitsschritten bestehen. Dabei ist die Taktzeit die durchschnittliche Zeit, in der ein Erzeugnis fertig produziert ist und kann als wichtige Stellgröße gesehen werden. Es gibt, wie in *Abbildung 2.2* dargestellt, drei Grundformen der Fließfertigung: [5]

- Konstante Fließfertigung
- Gruppenfließfertigung
- Wechselfertigung

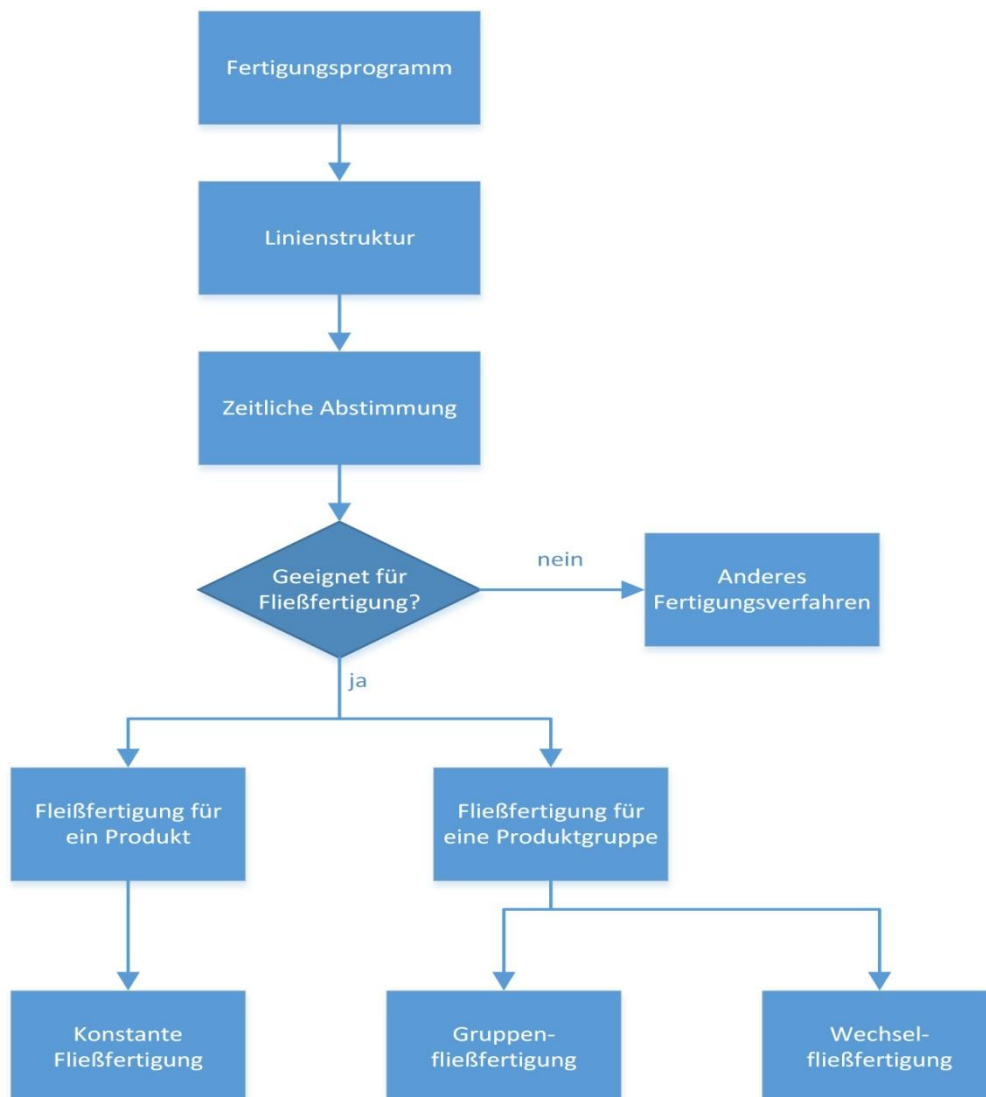


Abbildung 2.2 - Grundformen der Fließfertigung [5]

2.1 Niveau der Fertigung

2.1.1 Manuelle Fertigung

Als einfachste Form der Fließfertigung mit einem niedrigen technischen Niveau verliert die manuelle Fließfertigung auf Grund fortschreitender Automatisierung

immer mehr an Bedeutung. Das menschliche Leistungsniveau gibt die Grenzen der Projektierung dieser Produktionsform dar. [5]

Kennzeichnende Merkmale: [5]

- Arbeitsschritte werden ausschließlich durch menschliche Arbeit verrichtet
- Konzentration auf Erzeugnisfertigung
- Minimale Taktzeit vorgegeben durch menschliche Belastbarkeit
- Notwendigkeit von Pausen bzw. Einsatz von Springern um Mitarbeiter zu entlasten

Zusätzlich sind Überlegungen bezüglich der sicheren und ergonomischen Gestaltung des Arbeitsplatzes und der Qualitätskontrolle anzustellen. Die hohe Mitarbeiterbelastung bei geringen Taktzeiten und aufwendige Qualitätsüberwachung sind Nachteile der manuellen Fließfertigung. [6]

2.1.2 Mechanisierte Fertigung

Zunehmender Wettbewerbs- und Kostendruck erfordern Lösungen, die es ermöglichen mehr Produkte in gleicher Zeit bzw. zu geringeren Kosten zu produzieren. Die erste Stufe diesen Erfordernissen gerecht zu werden, ist eine Mechanisierung der Produktion, d.h. eine Unterstützung der menschlichen Tätigkeit durch Werkzeugmaschinen (z.B. Drehmomentschrauber).

Allerdings werden aus Gründen der Wirtschaftlichkeit "*Vorbereitungs-, Prüf-, Einstell- und Geschicklichkeitsarbeiten [...] noch manuell ausgeführt [...]*" [5, p. 872]

2.1.3 Automatisierte Fertigung

Die vollautomatisierte Fließfertigung ist die Stufe mit dem höchsten technischen Niveau. Der Mensch wird dabei, was direkte Arbeit am Erzeugnis angeht, komplett durch Maschinen und Roboter ersetzt bzw. hat nur Kontroll-, Einstell- und Wartungsarbeiten zu verrichten. [5]

2.2 Fertigungskosten

Die Herstellkosten sind, wie in *Abbildung 2.3* dargestellt, ein Teil der Selbstkosten und setzen sich aus den Materialkosten und den Fertigungskosten zusammen. Die

Fertigungskosten beinhalten Fertigungslöhne, Fertigungsgemeinkosten und Sondereinzelkosten. [7]

Eine Umstellung von manueller auf automatisierter Montage wirkt sich auf die Herstellkosten aus. Es ist vielleicht nicht direkt einsehbar, aber die Materialkosten werden praktisch nicht verändert. Dies hat damit zu tun, dass sich die Einkaufskosten selbst bei einer Erhöhung des Verbrauchs und somit der Bestellmengen meist nur marginal ändern. Daher ist leicht nachvollziehbar, dass sich eine Automatisierung im wesentlichen auf die Fertigungskosten auswirkt. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit wichtig, da ein Teil der vorgestellten Methodik aus einem Vergleich der Herstellkosten zwischen manueller und automatisierter Verschraubung besteht.

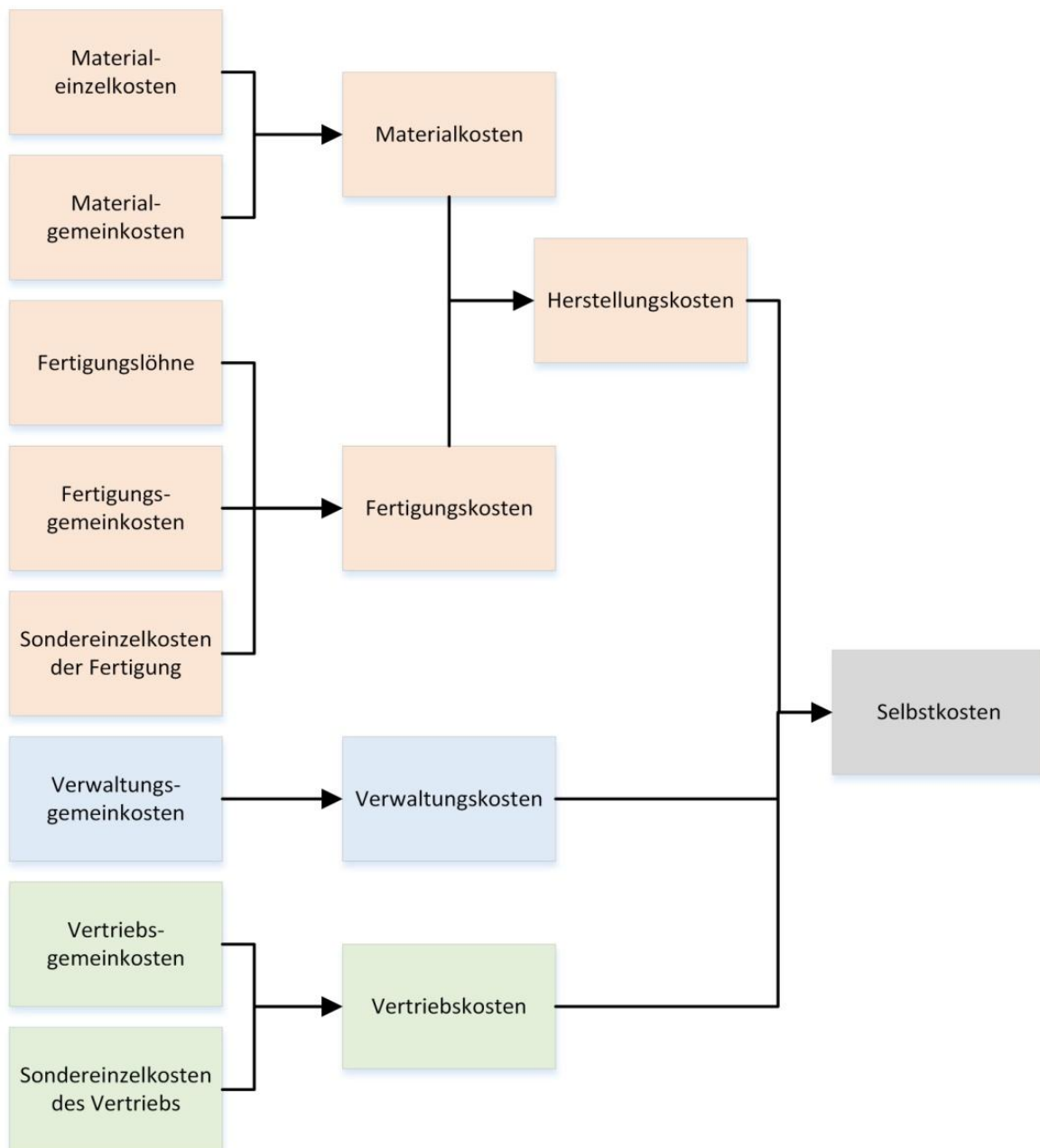


Abbildung 2.3 - Struktur der Selbstkosten bei differenzierender Zuschlagskalkulation

[4]

Grundsätzlich ist eins der wichtigsten, wenn nicht das wichtigste Ziel einer Automatisierung die Herstellungskosten zu senken. D.h. die Herstellungskosten bei automatisierter Montage HK_{aut} sollen kleiner als bei manueller Montage HK_{man} sein und lässt sich wie folgt darstellen: [3]

$$HK_{aut} < HK_{man}$$

Formel 1: Herstellungskostenvergleich

Da sich, wie bereits erläutert, die Materialkosten bei einer Automatisierung nicht ändern, gilt: [3]

$$F_{aut} < F_{man}$$

Formel 2: Fertigungskostenvergleich

mit F_{aut} Fertigungskosten bei automatisierter Montage

F_{man} Fertigungskosten bei manueller Montage

Die Fertigungskosten lassen sich durch Multiplikation der Stückzeit t und Stundensatz S berechnen. Damit lässt sich *Formel 2* wie folgt darstellen:

$$t_{aut} * S_{aut} < t_{man} * S_{man}$$

Formel 3: Fertigungskostenvergleich 2

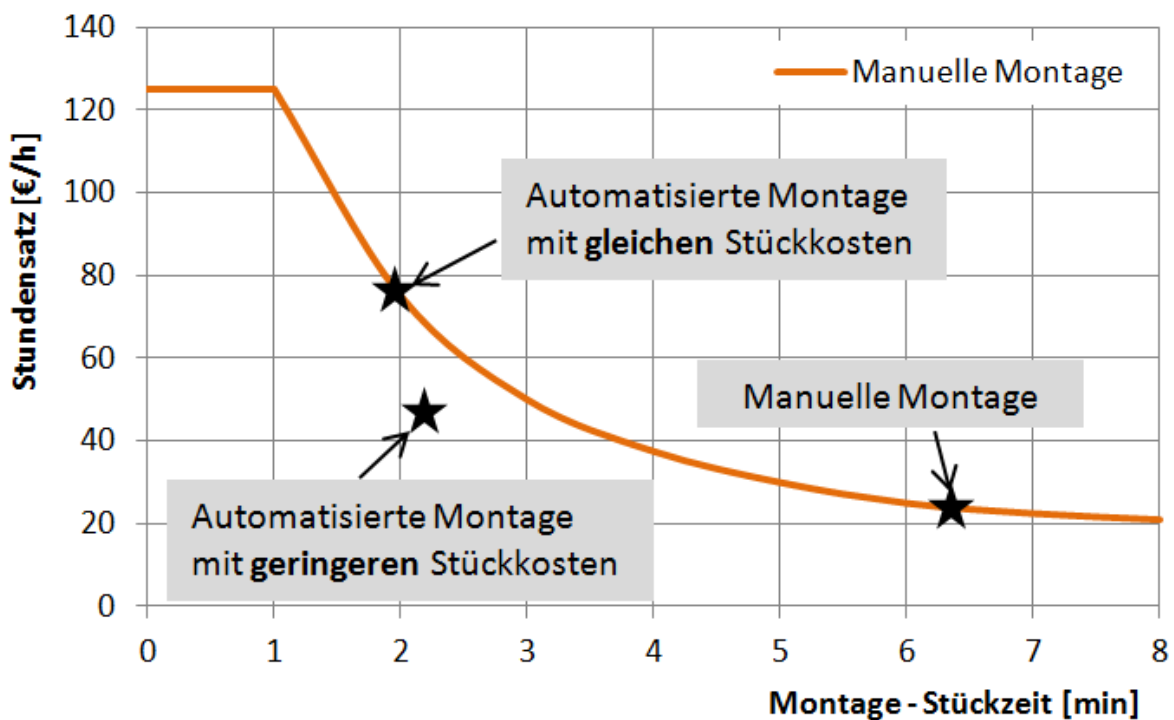


Abbildung 2.4 - Vergleich der Stückkosten bei manueller und automatischer Montage

Trägt man in einem Diagramm auf der Abszisse die Montagezeit und auf der Ordinate den Stundensatz auf, ist es möglich automatisierte und manuelle Lösung miteinander zu vergleichen. In *Abbildung 2.4* wird dies anhand eines Beispiels dargestellt. Um die zuvor aufgestellten Bedingungen zu erfüllen, muss die automatisierte Lösung unter der Hyperbel-Kurve liegen.

2.3 Fertigungsoptimierung

Ziel jedes Unternehmens ist es alle Prozesse bzw. Abläufe so optimal wie möglich zu gestalten. Um im Wettbewerb mithalten und sich eventuelle Wettbewerbsvorteile zu sichern, ist es unumgänglich vorhandene Strukturen und Systeme ständig zu überdenken und kritisch zu hinterfragen. Sowohl kleine Schritte in Form von KVP, als auch grobe Umstellungen in Form von Prozess-Reengineering stellen dabei hilfreiche Mittel dar. Dabei gilt es aber viele Herausforderungen zu meistern.

"Die Prozessoptimierung besteht aus den Aufgaben, Verbesserungsansätze zu identifizieren, Lösungsvorschläge zu entwickeln, die Lösungsvorschläge zu bewerten und die beste Lösung auszuwählen und umzusetzen." [8, p. 10]

Wesentlich dabei ist das die Lösungen sowohl effektiv, als auch effizient sind, was durch den schwarzen Pfeil in *Abbildung 2.5* angedeutet wird.

Prozesseffektivität: Ein Prozess ist dann effektiv, wenn dieser zuverlässig das gewünschte Ergebnis liefert. [8] Ist z.B. gefordert, dass fünf Schrauben mit einem gewissen Drehmoment angezogen werden sollen, dann ist es erforderlich, dass immer genau fünf Schrauben mit dem vorgegebenen Drehmoment angezogen werden, damit der Prozess effektiv ist.

Prozesseffizienz: Ein Prozess ist dann effizient, wenn mit minimalem Einsatz das gewünschte Ergebnis geliefert wird. [8] Z.B. ist es erforderlich, dass die Schrauben aus dem oben genannten Beispiel mit einem geeigneten Werkzeug in einer optimalen Zeit festzieht, damit der Prozess effizient ist.

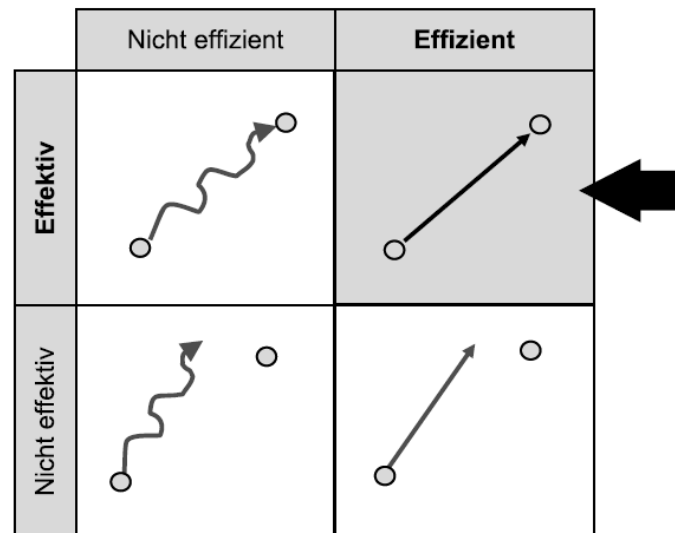


Abbildung 2.5 - Effizienz und Effektivität [8, p. 12]

2.4 Investitionsrechnung

Um eine Investition in eine neue Maschine, Gebäude oder Aktien bewerten zu können liefert die Investitionsrechnung die geeigneten Werkzeuge, vorausgesetzt Einnahmen und Ausgaben sind bekannt. Grundsätzlich lässt sich zwei Hauptformen der Investitionsrechnung unterscheiden [9]:

- die dynamische Methode
- die statische Methode

2.4.1 Die statische Methode

Wichtig bei der Beurteilung einer Investition ist die Amortisierungszeit bzw. die Zeit bis sich die Investition rechnet. Dabei haben die Nutzungsdauer, die Montage und der Investitionsrahmen wesentlichen Einfluss. Die statische Investitionsrechnung ermittelt die Zeit in der die getätigten Auszahlungen durch die Erlöse wieder zurückgeführt werden. Dabei wird folgende Formel verwendet: [6]

$$AZ_s = \frac{KE}{ES}$$

Formel 4: Amortisationszeit

AZs Amortisationszeit statisch

KE Investitionshöhe [€]

ES Einsparungen [€]

Da diese Methode nur begrenzte Aussagekraft hat, wird sie im Weiteren vernachlässigt.

2.4.2 Die dynamische Methode

Im Gegensatz zur statischen Methode berücksichtigt die dynamische Methode, dass Einzahlungen und Auszahlungen zu späteren Zeitpunkten wertmäßig auf den Entscheidungszeitpunkt diskontiert werden. Dabei werden Erträge die zu frühen Zeitpunkten erzielt werden höher bewertet als solche zu späteren Zeitpunkten. Der Grund liegt einfach darin, dass Erträge aus frühen Zeitpunkten gegebenenfalls wieder in ein anderes Projekt fließen können und daher zusätzlichen Nutzen und Erträge generieren. [6]

Häufig verwendete Verfahren [6]:

- dynamische Amortisationszeit:
 - Rückflüsse aus Erträgen werden abgezinst -> längere Amortisationszeit als bei der statischen Methode
 - hilft Risiko des Kapitaleinsatzes einzuschätzen
 - gibt Einblick auf den Einfluss der Investition auf die Liquidität
- Kapitalwertmethode:
 - macht verschiedene Investitionen vergleichbar
 - Grundlage bildet Kapitalwert
- Interner Zinsfuß
 - hilft Investitionsvorhaben zu priorisieren
 - so verzinst, dass Kapitalwert der Investition null wird

2.5 MTM - Analyse

MTM steht für Methods-Time Measurement, was mit Methodenzeit-Messung übersetzt werden kann. Eine Methodenzeit ist nach Definition der MTM-Vereinigung eine Zeit, die für die Durchführung einer bestimmten Tätigkeit benötigt wird und von der verwendeten Methode abhängt. Bewegungsabläufe werden in

Grundbewegungen, welche abhängig von verschiedenen Faktoren in der Höhe verschiedene Normzeitwerte beanspruchen, unterteilt. Solche Faktoren sind beispielsweise die Bewegungslänge oder die Größe eines zu montierenden Teils. 0,036 Sekunden wurden als kleinste Maßeinheit TMU (Time Measurement Unit) festgelegt. [6]

3 Automatisierung der Fertigung

Automatisierung eines Industrieprozesses heißt Tätigkeiten, die vorher manuell ausgeführt worden sind, in Zukunft durch Maschinen zu unterstützen bzw. bei Vollautomatisierung die Maschine oder den Roboter die Arbeit erledigen zu lassen. Grundsätzlich sollen manuelle und handwerkliche Ansätze abgebaut werden. Dabei reicht der Anwendungsbereich von Fräsmaschinen, über Schraubroboter bis hin zu kompletten Montagerobotern. [8]

Die Globalisierung und der damit immer stärker werdende Konkurrenz- und Wettbewerbsdruck in Kombination mit immer kürzerer Produktlebensdauer und zunehmender Variantenvielfalt haben einen Trend zu Industrieroboteranwendungen ausgelöst, welcher sich auch in Zukunft fortsetzen wird. Dazu kommen steigende Lohnkosten.

Hauptziel einer Automatisierung bzw. Mechanisierung, ist die Zeit, die wertschöpfend am Produkt gearbeitet werden muss, zu verkürzen. Darüber hinaus wird angestrebt die Nebenzeiten bzw. die Zeit, die für nicht-wertschöpfende Tätigkeiten benötigt wird, zu reduzieren. [8]

Aufgrund der zunehmenden technischen Entwicklung lassen sich immer kompliziertere Aufgaben in der Fertigung und Montage mechanisieren bzw. automatisieren. Maschinen lassen sich programmieren und können so Arbeitsschritte in gleicher Qualität wiederholbar ausführen, was einen positiven Effekt auf Haupt- und Nebenzeiten hat. Allerdings steigt die Komplexität der Automatisierungslösungen, daher muss auch die Qualifikation der Bediener steigen. [8]

3.1 Automatisierbarkeit von Prozessen

Wesentlichen Einfluss auf die Automatisierbarkeit bzw. höhere Automatisierung hat die Schwierigkeit der auszuführenden Tätigkeit wie z.B.:

- Finden des Fügeortes
- Zugänglichkeit zum Fügeort
- Verhaken von Fügeteilen
- Werkstücksteifheit

- Sichern von Teilen während der Montage

[6]

Dabei geht der Schwierigkeitsgrad der Automatisierung laut [6] von leicht bis schwierig, wobei Einlegen und Pressen eher leicht sind, wohingegen Schrauben eine größere Herausforderung darstellt.

Neben den technischen Verfahren spielen andere Faktoren für die Machbarkeit eine Rolle. Laut [6] sind "[...] *auch Zeitdauer, Zuverlässigkeit, Genauigkeit und die Kosten der auszuführenden Montageoperation mit zu betrachten*" [6, p. 196]

3.2 Flexibilität

Produktionsunternehmen fordern in zunehmenden Maße eine flexible Automatisierung, um auch neue Erzeugnisse oder Änderungen mit den bereits vorhandenen teuren Anlagen fertigen zu können. Als flexibel ist zu verstehen, dass "[...] *die Durchführung der Fertigung von verschiedenen Produkten auf Anlagen, bei denen der Mensch weder ständig noch in einem erzwungenen Rhythmus für ihren Ablauf unmittelbar tätig werden muss und bei denen die Umstellung von einem Produkt zu einem anderen in einfacher Weise möglich ist.*" [3, p. 1]

Um flexibel zu sein muss ein Roboter folgende Eigenschaften besitzen [6]:

- Umrüstbarkeit: Es muss möglich sein von Produkt zu Produkt durch Umprogrammieren schnell umzurüsten, idealerweise zwischen zwei Takten. Gleiches gilt für unterschiedliche Varianten von Produktfamilien
- Wiederverwendbarkeit: Es wird vorausgesetzt, dass neue Aufgaben mit einem Großteil bereits bestehender Standardbauteile ausgeführt werden können.


War es früher nur möglich und vor allem sinnvoll Großserienfertigung zu automatisieren, so ist es heute aus Kosten- und Qualitätsgründen erforderlich auch Einzel- und Kleinserienfertigung zu automatisieren. Dies ist durch technische Entwicklungen im Bereich der elektronischen Steuerung möglich geworden. Während die Reduzierungsmöglichkeiten für Zeiten der Teilefertigung weitestgehend

ausgeschöpft sind, gibt es im Bereich der Montagezeitverkürzung noch deutliche Potentiale. [3], [10]

3.3 Problem der Komplexität

"Die Komplexität der Prozesse wird durch die Anzahl der Prozessbestandteile, durch die Vielfalt der Bestandteile, durch die Veränderlichkeit der Prozessbestandteile und die Vernetzung zwischen den Teilen charakterisiert" [11, p. 25]

Sowohl die zunehmende Vielfalt an Produkten, kleinere Lose und auch eine hohe Anzahl an verschiedenen Montagevorgängen machen eine Automatisierungslösung sehr komplex. Um dieser Schwierigkeit zu begegnen, macht es Sinn geeignete Klassen zu bilden, wie in *Abbildung 3.1* dargestellt. [3]



Branche	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
	≤ 30 Teile	31 - 500 Teile	> 500 Teile
Maschinenbau	Lager	Getriebe	Landw. Maschinen
Fahrzeugbau	KFZ - Zulieferteile	Motoren	Fahrzeuge
Elektrotechnik	Leiterplatten	Regelgeräte	TV-Geräte

Abbildung 3.1 - Gliederung der Montageaufgaben nach Komplexität [3]

Dies ermöglicht es Montageaufgaben, welche zunächst sehr komplex erscheinen, in kleiner Teilaufgaben zu unterteilen. Diese sind dann sowohl leichter zu planen, als auch leichter zu automatisieren.

3.4 Automatisierungsgrad

Laut DIN 19233 ist der Automatisierungsgrad definiert als "Anteil der automatisierten Funktionen an der Gesamtfunktion einer Anlage" [12] und wird berechnet mit:

$$\text{Automatisierungsgrad [\%]} = \frac{\sum A_{aut}}{\sum A_{ges}} * 100$$

Formel 5: Automatisierungsgrad

mit $\sum A_{aut}$ Summe der automatisierten Arbeitsschritte
 $\sum A_{ges}$ Summe der gesamten Arbeitsschritte

Ein weltweit steigender Automatisierungsgrad ist zu beobachten. Eine immer sicherere, robustere und vielseitigere Automatisierungstechnik hat dazu geführt, dass immer mehr Maschinen und Anlagen gekauft werden. Besonders hervorzuheben ist der Zuwachs bei Roboterkäufen in der Industrie, der selbst in Krisenzeiten nur kurz ungebrochen wurde, wie in *Abbildung 3.2* dargestellt.

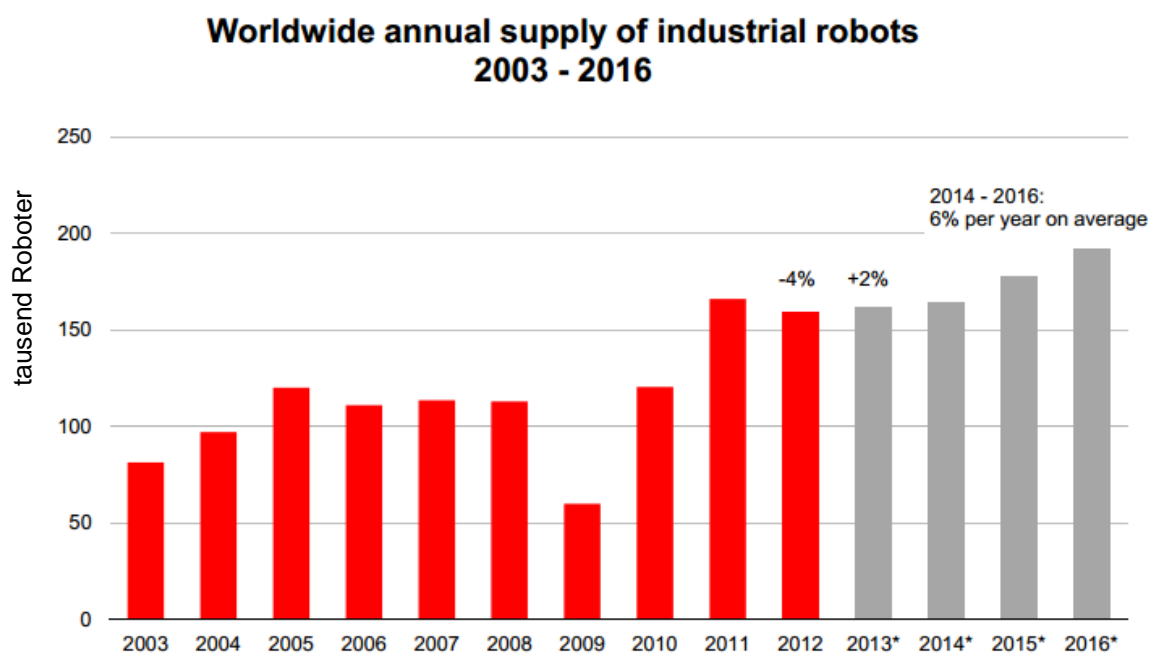


Abbildung 3.2 - Weltweiter Absatz von Industrierobotern [13]

Ein höherer Automatisierungsgrad von Fabriken oder einzelnen Bereichen bedeutet auch, dass die fixen Kosten steigen, da der Kapitaleinsatz pro Arbeitsplatz steigt.

Zusätzlich nimmt auch die Komplexität der Systeme zu. Daher ist es zwingend notwendig sorgfältig zu planen, um ein optimales Verhältnis zwischen manuellen und automatisierten Arbeitsschritten zu erreichen. Als ein intelligentes System zur Erhöhung des Automatisierungsgrades und Beherrschung der Komplexität hat sich das *Hybride Montagesystem* herausgestellt. Mensch und Maschine wirken synchron zusammen. In *Abbildung 3.3 - Einsatzbereiche manueller, hybrider und automatischer Montagesystem* ist zu erkennen, dass dieses System zwischen der manuellen und vollautomatisierten Fertigung anzusiedeln ist. Verkürzte Produktlebenszyklen, zunehmende Produktvarianz und höhere Qualitätsanforderungen führen dazu, dass derartige Mischsysteme immer größere Bedeutung und Anwendung finden. [6], [14]

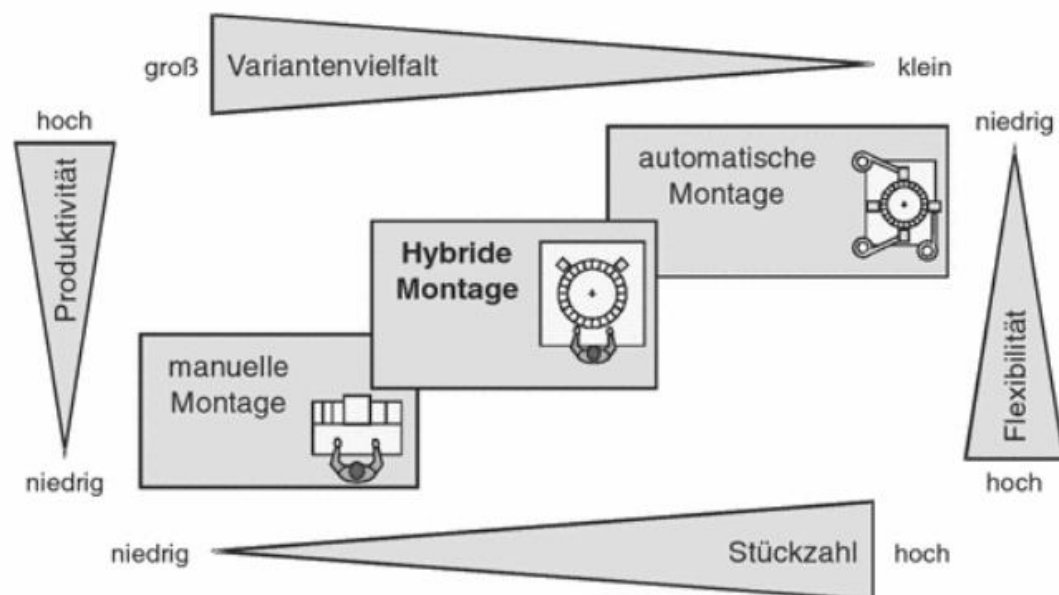


Abbildung 3.3 - Einsatzbereiche manueller, hybrider und automatischer Montagesystem [6]

Besonders hoch ist der Automatisierungsgrad in Montage- und Fertigungssystemen. Trotzdem hat menschliche Arbeit noch immer einen sehr hohen Stellenwert, wie in *Abbildung 3.4* dargestellt. [14]

Wie wichtig wird menschliche Arbeit (Planung, Steuerung, Ausführung, Überwachung) in fünf Jahren für die Produktion sein?

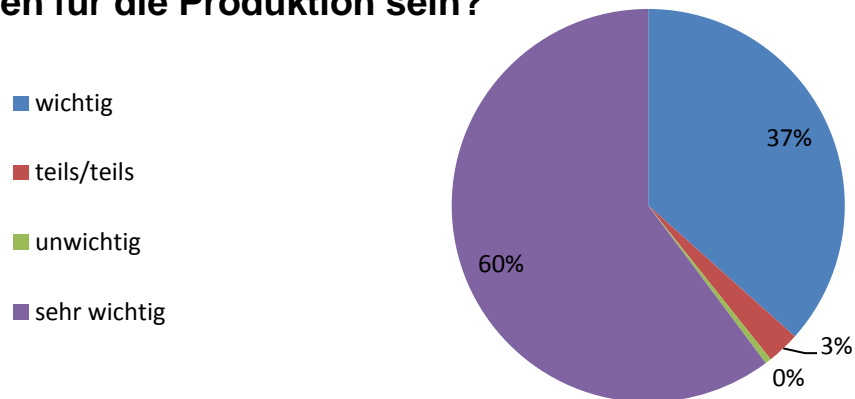


Abbildung 3.4 - Expertenbefragung zur Wichtigkeit von menschlicher Arbeit in der Produktion [15]

3.5 Ethik und Automatisierung

Im Zusammenhang mit Automatisierung kommt es häufig zu Ethik-Diskussionen. Das Ersetzen des Menschen durch Roboter hat dabei oft einen negativen Beigeschmack. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den ethischen Fragen bezüglich Automatisierung.

Um eine adäquate Beleuchtung dieses Aspektes zu gewährleisten, muss zunächst ein einheitliches Begriffsverständnis geschaffen werden. Als wissenschaftliche Disziplin versucht die Ethik das Verhalten des Menschen bezüglich der Sittlichkeit zu bewerten. Je nach Tradition und Kultur kann das Verständnis von Sittlichkeit sehr unterschiedlich sein.

Die Gleichsetzung von Wegfall menschlicher Arbeit zu Gunsten automatisierter Lösungen verdeckt aber die positiven Auswirkung, auch auf den Menschen.

"Das Ziel allen technischen Handelns soll es sein, die menschlichen Lebensmöglichkeiten durch Entwicklung und sinnvolle Anwendung technischer Mittel zu sichern und zu verbessern." [16, p. 12]

Wichtige Punkte, die meist mit einer Automatisierung einher gehen und auch im Sinne der Mitarbeiter sind, sind:

1. *Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit*

Vor dem Hintergrund immer härterer Konkurrenz und zunehmendem Wettbewerbsdruck wird es immer schwieriger Gewinne zu erzielen. Für ein Unternehmen ist dies aber langfristig notwendig, um erfolgreich zu sein. Automatisierungen bieten dabei ein großes Potential bei der Kostensenkung. Im Einzelfall hat dies einen negativen Einfluss auf Arbeitsplätze. Im Vergleich zu Standortverlagerungen in Billiglohnländer oder gar einer kompletten Schließung stellt dies ein eher kleines Problem dar.

2. *Schonung der Mitarbeitergesundheit*

Speziell in westlichen Ländern spielt die Gesundheit der Mitarbeiter eine wichtige Rolle. Zusätzlich schützen Gesetze und Richtlinien vor unzulässigen psychischen oder physischen Belastungen. Kann durch Automatisierung die Mitarbeiterbelastung gesenkt werden, so ist dies auf jeden Fall positiv zu bewerten

3. *Qualitätssteigerung*

Eine Automatisierung geht meist mit einer Qualitätssteigerung in der Produktion einher. Dies führt zu einer geringeren Ausschussquote, geringeren Kosten und höherer Kundenzufriedenheit. Damit wird wiederum die Wettbewerbsfähigkeit gesteigert, was sich, wie in Punkt 1 gezeigt, insgesamt positiv auswirkt. Zusätzlich führt eine geringere Ausschussquote zu einer geringeren Belastung der Umwelt durch schonendere Ressourcenverwendung.

4. *Schaffung neuer Arbeitsplätze*

Ein Aspekt der häufig vergessen wird ist, dass im Zusammenhang mit Automatisierungslösungen neue Geschäftszweige, Unternehmen und somit Arbeitsplätze entstanden sind. Auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik

werden im Bereich Forschung, Entwicklung, Herstellung, Wartung und Instandhaltung neue und qualitativ hochwertige Arbeitsplätze geschaffen.

4 Die automatisierte Verschraubung

4.1 Die Schraubverbindung

4.1.1 Allgemein

Die Schraubverbindung ist laut DIN8593-3 [17] ein Fertigungsverfahren bei welchem durch Einpressen gefügt wird, wie in *Abbildung 4.1* dargestellt.

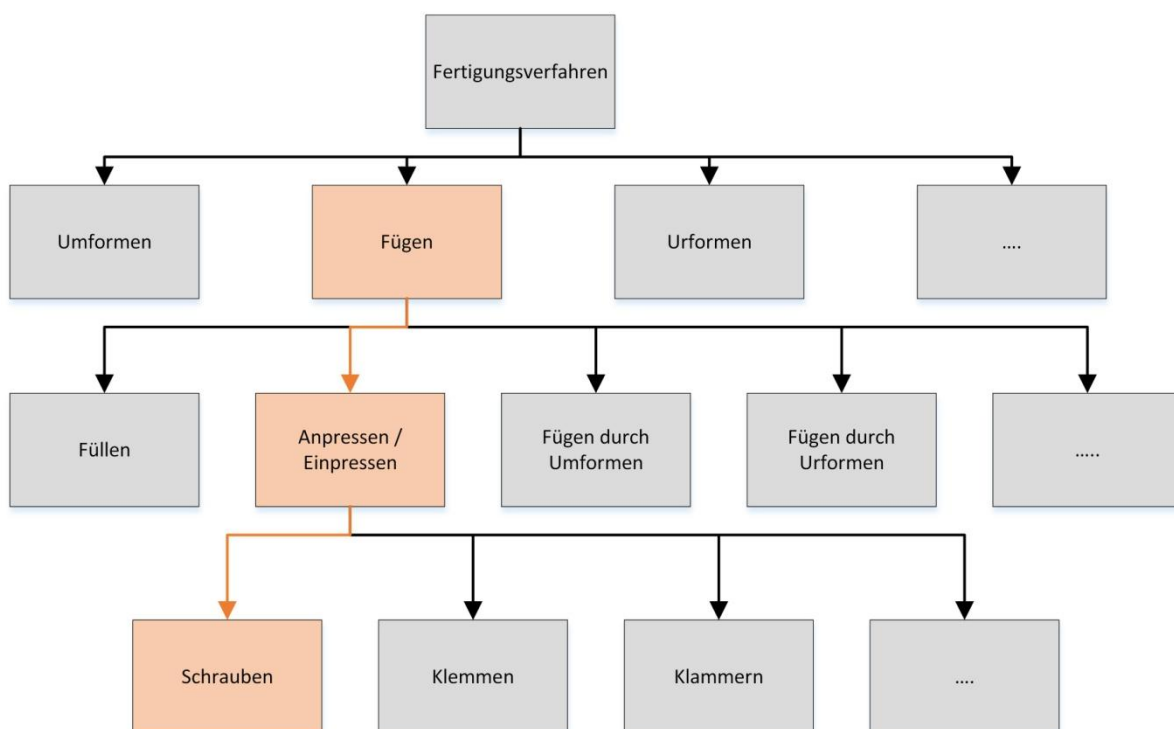


Abbildung 4.1 - Übersicht über Fertigungsverfahren [17]

Mit einer Schraubverbindung werden zwei oder mehr Teile miteinander verschraubt mit dem Ziel, dass sich diese dann verhalten, als wären sie ein Stück. Die Verbindung muss auch unter den vorhandenen Lastbedingungen die geforderten Ansprüche erfüllen. [18] Dies kann z.B. eine Dichtfunktion bei Rohrleitungen, die unter Druck stehen, oder die Erhaltung eines ausreichenden Reibschlusses bei Torsionsbelastungen sein.

4.1.2 Einflussfaktoren auf die Schraubverbindung

Im Betrieb wirken sich verschiedenste Faktoren auf eine Schraubverbindung aus. Diese sind in *Abbildung 4.2* dargestellt.

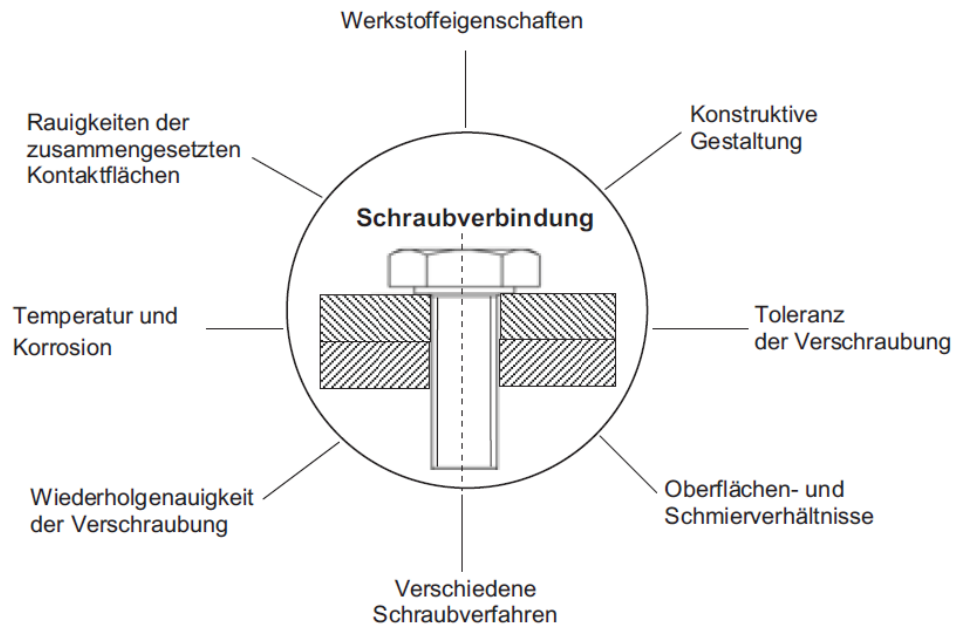


Abbildung 4.2 - Einflussfaktoren auf eine Schraubverbindung [18]

4.1.3 Anziehverfahren

Wesentlich für die Betriebsfestigkeit einer Schraubverbindung ist die Vorspannkraft die erzeugt wird. Da aber eine direkte Messung dieser Kraft sehr umständlich ist, wird in der Praxis auf andere, indirekte, Messverfahren zurückgegriffen. [3]

Beispiele für direkte Messverfahren [3]:

- Druckmessdose unter dem Schraubenkopf
- Dehnmessstreifen am Schraubenschaft zur Messung der Dehnung

Messgrößen, die einen indirekten Schluss auf die Vorspannkraft zulassen [19]:

- Drehmoment
- Drehwinkel
- hydraulischer Druck
- usw.

Die wichtigsten Anziehverfahren, die auf einer indirekten Messung der Vorspannkraft beruhen sind [19]:

- drehmomentgesteuertes Anziehen: Wie der Name schon sagt, wird in diesem Fall das Anzugdrehmoment als Steuergröße verwendet. Die einfache Ausführung und Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens haben dazu geführt, dass die meisten Schrauben damit festgezogen werden. Ein Nachteil stellt die Ungenauigkeit dieses Anziehverfahrens dar.
- drehwinkelgesteuertes Anziehen: Die Schraube bzw. Mutter wird mit einem sogenannten Setzmoment angezogen. Danach wird die Schraube bzw. Mutter um einen bestimmten Winkel weiter angezogen.
- streckgrenzengesteuertes Anziehen: Die Schraube bzw. Mutter wird bis zu deren Streckgrenze angezogen. Die optimale Ausnutzung der Schraubenbelastbarkeit, hoher Grad an Fehlererkennung und eine verbesserte Dauerhaltbarkeit der Verbindung stehen einem hohen Geräte- und Messaufwand entgegen.

Eine weitere Methode stellt das Anziehen per Hand bzw. mit einem Anziehwerkzeug dar. Typische Montagewerkzeuge sind z.B. Drehschrauber, Drehschlagschrauber oder ein Drehmomentschlüssel. [19] Mit diesen Werkzeugen sind mehr oder weniger genaue Ergebnisse zu erreichen. Der Faktor Mensch als Bediener trägt oft zusätzlich dazu bei, dass keine konstant gleichen Anzugmomente verwirklicht werden können und dass eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse nicht gegeben ist. Vor dem Hintergrund der immer höheren Qualitätsansprüche führt dies dazu, dass, egal welches Anziehverfahren gewählt wird, automatisierte Verschraubungslösungen immer mehr an Bedeutung gewinnen werden. Eine computergestützte Überwachung und Aufzeichnung des Drehmoments

4.1.4 Bedeutung von Schraubverbindungen hinsichtlich Automatisierung

Vor allem Produktionsbetriebe in Europa sind einem hohen Kosten- und Qualitätsdruck ausgesetzt, deshalb kann eine Automatisierung ein wesentlicher

Wettbewerbsvorteil sein. Als eine der am häufigsten angewandten Fügeverbindungen, wie in *Abbildung 4.3* dargestellt, eröffnen automatisierte Schraubverfahren ein großes Einsparungspotential. [20]

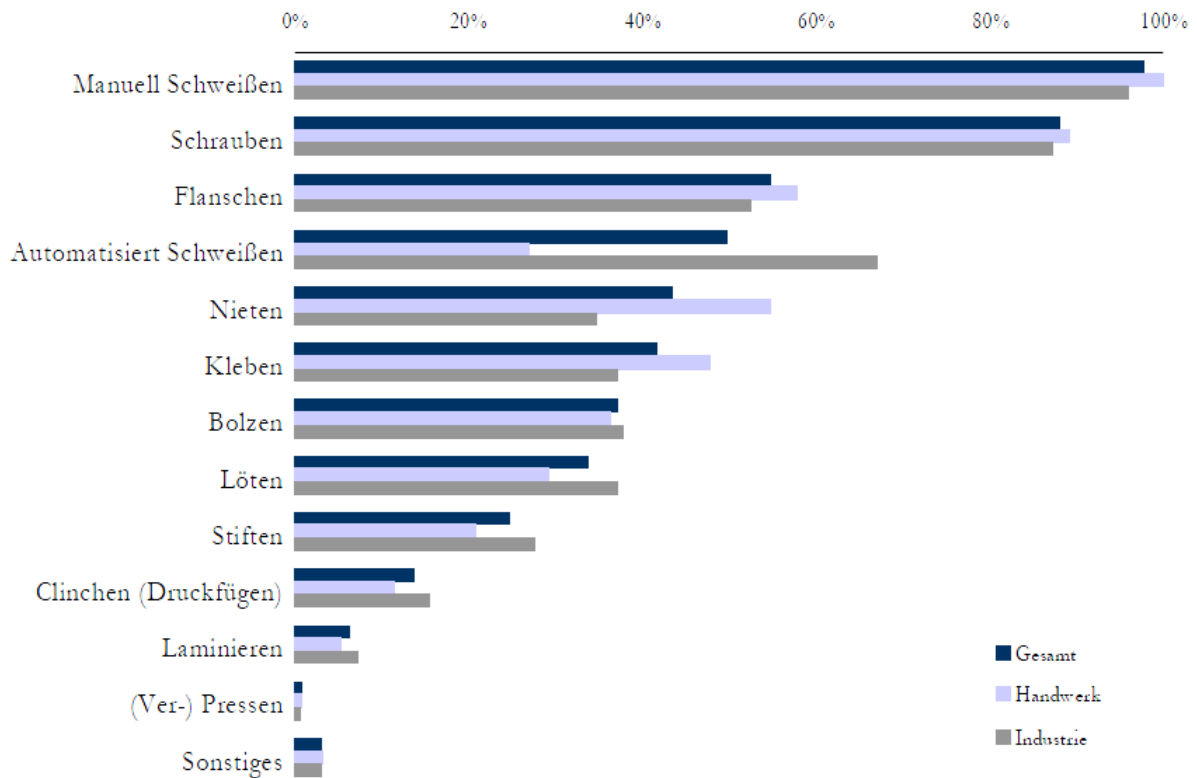


Abbildung 4.3 - Häufigkeit der angewandten Fügeverfahren [21, p. 23]

Die Schraubverbindung findet nicht nur häufigen Gebrauch, sie bietet auch viele Vorteile, angefangen von der einfachen Montage und Demontage, über die Wiederverwendbarkeit, bis hin zur hohen Temperaturbeständigkeit.

Die Bedeutung der Schraubenverbindung wird noch deutlicher, wenn man bedenkt, dass die Anzahl dieser im Automobilbau, Maschinenbau und Flugzeugbau zunimmt und gleichzeitig die Anforderungen bezüglich Verschraubungsqualität und Produktivität stetig steigen. [20] Genau unter diesen Gesichtspunkten kann eine automatisierte Verschraubung das volle Potential ausschöpfen. Die gute Reproduzierbarkeit und Nachvollziehbarkeit in Kombination mit der schnellen und sicheren Erledigung des Prozesses lassen nur einen Schluss zu, nämlich dass die Unternehmen, die auch zukünftig wettbewerbsfähig sein wollen, den Automatisierungsgrad der Schraubprozesse erhöhen müssen.

4.2 Komplexität und Flexibilität

4.2.1 Komplexität

Grundsätzlich sollte klar sein, dass sich eine erhöhte Komplexität nicht nur auf den Investitionsaufwand auswirkt. Je höher die Komplexität ist, desto anfälliger ist die Anlage für Störungen, desto intensiver ist die Wartung und das benötigte Know-How ist größer.

Laut [3] kann zwischen drei Komplexitätsstufen unterschieden werden, wie in dargestellt. Wird z.B. der Schrauber manuell geführt und die Schraube automatisch zugeführt, entspricht dies der Komplexitätsstufe 1.




Schrauber - Führung	manuell	manuell	automatisch
Schrauben - Zuführung	manuell	automatisch	automatisch
	 K = 0	 K = 1	 K = 2

Abbildung 4.4 - Komplexitätsstufen [3]

Jede Komplexitätsstufe zeigt unterschiedliches Verhalten bei fehlerhaften Schrauben, wie in *Abbildung 4.5* dargestellt. Je komplexer, desto länger ist die Störzeit und Störanfälligkeit. [3]

	KOMPLEXITÄT		
	K = 0	K = 1	K = 2
Bit klemmt	-	-	Störung
Kopfabriss	-	Störung	Störung
kein Gewinde	-	Störung	Störung
kein Schlitz	-	Störung	Störung

Abbildung 4.5 - Einfluss der Komplexität und Fehlerart der Schrauben auf die Störempfindlichkeit [3]

Fehlt z.B. bei einer Schraube das Gewinde wird der Mitarbeiter bei manueller Montage ($K=0$) dies sofort erkennen, eine andere Schraube verwenden und es kommt in der Folge zu keiner Störung. Ein Montageautomat ($K=2$) ist in der Regel nicht in der Lage diesen Fehler zu erkennen. In der Folge kommt es zu einer Anlagenstörung.

4.2.2 Flexibilität

Entsprechend der Anforderungen an die Schraubanlage gibt es verschiedene Ausführungsformen. Hauptsächlich entscheiden die geforderte Flexibilität und die Losgrößen darüber, welche Form zum Einsatz kommt. Handschrauber sind höchst flexibel, sind aber bezüglich der Produktivität sehr eingeschränkt und eignen sich daher für Kleinst- und Kleinserienfertigung.

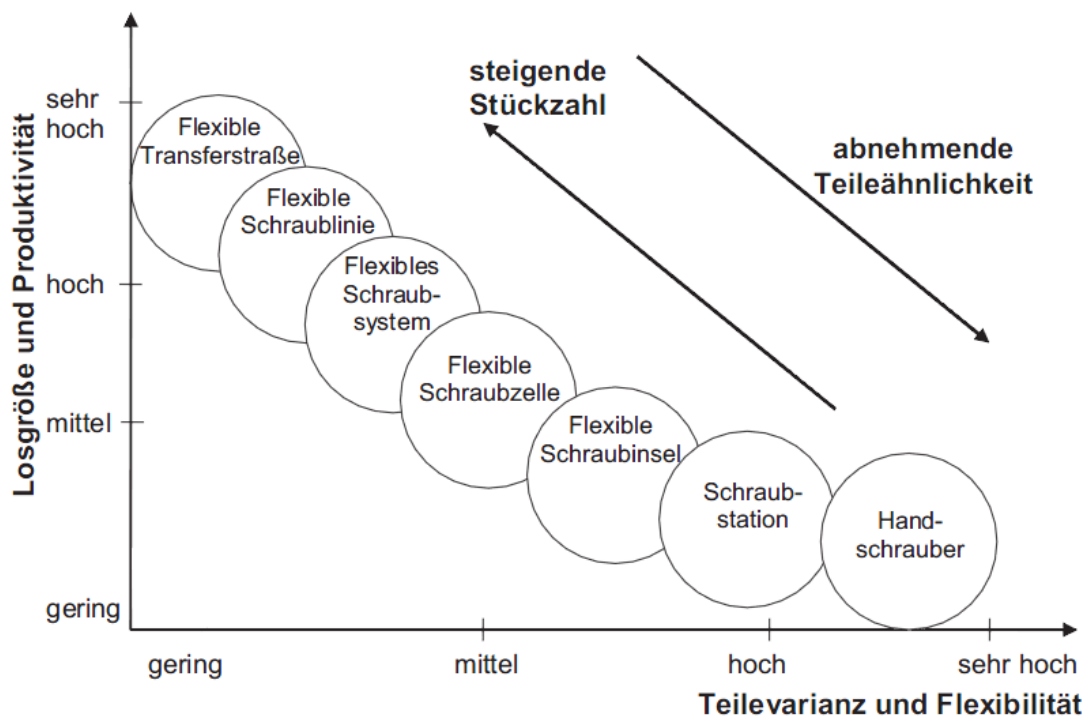


Abbildung 4.6 - Ausführungsformen von Schraubanlagen [22]

4.3 Technische Anforderungen an eine automatisierte Verschraubung bzw. an den Schraubautomaten





Als sehr komplexer Prozess stellt das Verschrauben hohe Anforderungen an den Roboter. Folgende Aufgaben muss eine automatisierte Schraubstation erfüllen können [6]:

- Speicherung von unsortierten Schrauben
- geordnetes Vereinzeln und Zuführen der Schrauben
- Fügen der Schraube an der gewünschten Position
- Eindrehen der Schraube
- Stufenlose Einstellen des Anziehmoments

Zusätzlich ist eine durchgehende Kontrolle und Steuerung des Prozesses notwendig. Der Füllstand des Schraubenbehälters, die korrekte Zuführung zum Mundstück des Schraubers und der Schraubprozess an sich sind die wesentlichen Faktoren, die überwacht werden müssen. [6]

Um den Prozess so stabil wie möglich zu gestalten sind folgende Punkte wichtig [6]:

- Wählen eines günstigen Längen-Durchmesser-Verhältnisses im Bereich zwischen zwei und zehn der Schrauben. Bei zu langen Schrauben kommt es zu Problemen bei der Stabilität des Zuführprozesses. Ebenso sind zu kurze Schrauben zu vermeiden.
- Es ist eine schaftlastige Schwerpunktlage der Schrauben zu wählen.
- Der Schraubenkopf ist so zu gestalten, dass eine schnelle und einfache Ankopplung des Werkzeuges möglich ist. *Abbildung 4.7* gibt Aufschluss über die Eigenschaften der verschiedenen Kopfformen.

	Kopfform			
	 Innentorx	 Außensechskant	 Kreuzschlitz	 Schlitz
Übertragung hoher Anzugsmomente	9	8	5	3
Werkzeugfindezeit	7	7	5	1
Empfindlichkeit gegenüber Positionierungsfehlern	9	5	8	6
geringe Ankopplungskraft	10	10	3	4
Preis	1	5	7	10

Bewertung: 10 Optimal
0 nicht erfüllt

Abbildung 4.7 - Einfluss der Schraubenkopfgestaltung [3]

Um einen möglichst stabilen, unempfindlichen und schnellen Einschraubprozess zu garantieren ist der Innentorx als Kopfform zu wählen. Bezieht man die Kosten in die Betrachtung mit ein, so stellt der Außensechskant einen optimalen Kompromiss dar. Schrauben mit Kreuzschlitz oder Schlitz sind auf Grund der benötigten hohen Ankopplungskräfte und der Empfindlichkeit gegenüber Positionierungsfehlern mäßig geeignet für eine automatisierte Verschraubung.

- Die Schrauben müssen möglichst abriebfest sein, um die Störanfälligkeit der Schraubzufuhr zu senken.

4.4 Komponenten eines Schraubroboters

4.4.1 Schraubspindel

Grundsätzlich besteht die Schraubspindel aus einem Motor, einem Getriebe, einer Sensorik und einem Abtriebselement.

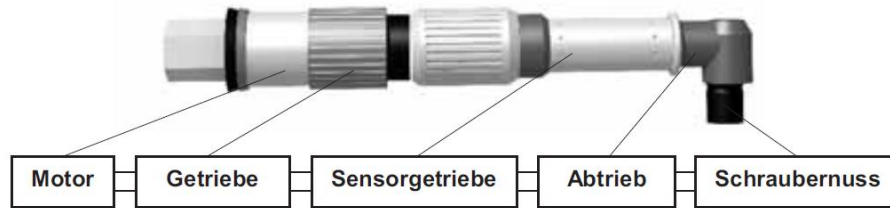


Abbildung 4.8 - Beispiel eines automatisierten Schraubspindels [20]

Folgende Eigenschaften sollte ein Schraubspindel haben [3]:

- Abmessungen aller Bauteile sollen möglichst klein gehalten werden. Kleine Durchmesser der Elemente erlauben den Einsatz von Mehrfachschraubern auch bei kleinen Schraubabständen zu realisieren.
- Hohe Drehzahlen der ersten Schrauberstufe stellen sicher, dass die Einschraubzeiten möglichst kurz gehalten werden.
- Eine hohe Dynamik des Antriebsmotors garantiert kurze Bremszeiten. Dadurch wird optimales Erreichen der geforderten Schraubparameter möglich.

4.4.2 Der Roboter

Die Definition eines Industrieroboters lautet nach VDI 2860 wie folgt:

"Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegung hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d.h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen." [23]

Das Robot Institute of America RIA definiert einen Industrieroboter wie folgt:

"Ein Industrieroboter ist ein programmierbarer Mehrzweck-Manipulator für das Bewegen von Material, Werkstücken, Werkzeugen oder Spezialgeräten. Durch den frei programmierbaren Bewegungsablauf ist er für verschiedenste Aufgaben einsetzbar." [24]

Industrieroboter können vielfältig eingesetzt werden und können verschiedenste Aufgaben erledigen. Je nach Einsatzgebiet ergeben sich verschiedene Bauformen, die an Anforderungen angepasst sind.

Ein Kriterium anhand dessen man Industrieroboter unterscheiden kann, ist die verwendete Kinematik: [25]

- Parallele Kinematik: Parallelkinematik-Roboter basieren auf einer Kinematik, bei der die Greiferplattform von drei bis sechs parallel angeordnete Linearachsen oder Gelenkarmen geführt wird, die in einer festen Basis gelagert sind. Sind die Bewegungsabläufe einfach, die geforderte Prozessgeschwindigkeit hoch und der zur Verfügung stehende Arbeitsraum klein, bieten Parallelkinematik-Roboter, wie in *Abbildung 4.9* dargestellt eine optimale Lösung.



Abbildung 4.9 - High Speed Pick & Place Roboter Adept Quattro s650H/850 H , [26]

- Serielle Kinematik: Roboter mit serieller Kinematik, wie in *Abbildung 4.10* dargestellt, sind dreidimensional beweglich. Mehrere miteinander gelenkig verbundene Glieder ermöglichen eine extrem hohe Beweglichkeit und Flexibilität. Sind genau diese Eigenschaften gefordert, der Arbeitsraum relativ groß und die geforderte Arbeitsgeschwindigkeit nicht zu hoch ist der Einsatz eines Roboters mit serieller Kinematik optimal.

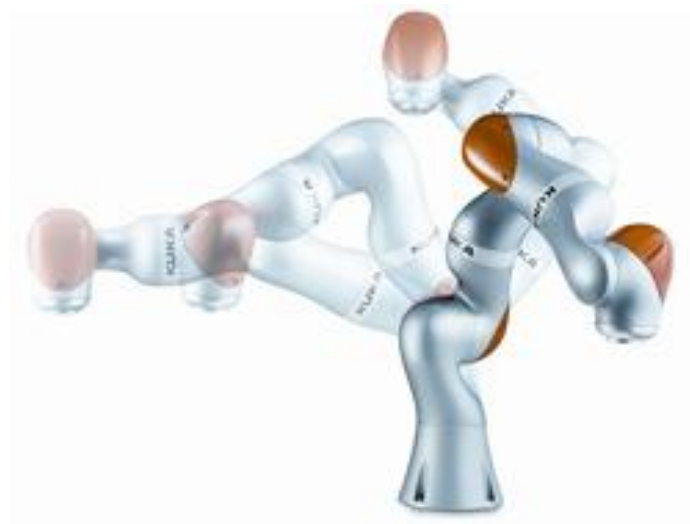


Abbildung 4.10 - Industrieroboter "iiwa", [27]

4.4.3 Steuerung

Über eine externe Programmierereinheit wird der Schraubablauf bestimmt. Dieser Ablauf wird vom Manipulator und dem Schraubspindel ausgeführt. Die Steuerung als Mehrprozessorsystem verarbeitet dabei Sensorsignale, wie das Drehmoment und die Position des Manipulators, und leitet daraus ein Steuersignal für den Leistungsverstärker ab. [3]

Die Ergebnisse bzw. der Ablauf des Prozesses der von der Steuereinheit erfasst wird kann mit einem Statistikprogramm ausgewertet werden.

4.4.4 Automatisierte Schraubenzuführung

Für die Automatisierung eines Schraubprozesses spielt die automatisierte Zuführung eine wichtige Rolle. Eine unzureichende Konstruktion dieser kann im späteren Betrieb zu erhöhter Störanfälligkeit führen. Im Idealfall erkennt die Zuführung fehlerhafte Schrauben, ist in der Lage Probleme mit im Linienförderer verklemmten Schrauben automatisch zu lösen und führt eine Schraubenidentifikation durch, damit die richtigen Schrauben zur Schraubstelle gelangen. [3]

Bei der gängigsten Form der Zuführung wird die Schraube über einen Zuführschlauch per Druckluft in die Zuführzange gefördert. Die Schraube wird solange festgehalten bis sie den Gewindeanfang der Schraubstelle berührt und der Schrauber den Schraubenkopf berührt. [3]

4.5 Maßnahmen für einen störungsfreien Betrieb

Einige der wichtigsten Ziele einer Automatisierung sind die Kosten zu senken und die Produktivität zu steigern. Treten im Betrieb häufige Störungen auf, steht dies diametral zu diesen Zielen. Bedenkt man zusätzlich, dass eine Automatisierung meist mit einer nicht unbeträchtlichen Investition verbunden ist, ist klar, dass ein weitestgehend störungsfreier Betrieb angestrebt wird.

Laut [3] gibt es einige Maßnahmen, um die Störanfälligkeit von automatisierten Schraubprozessen zu senken. Die wichtigsten sind:

- **Sorgfältige Produktkonstruktion:** Wird bei der Konstruktion bereits auf eine gute Zugänglichkeit zur Verbindungsstelle geachtet, passende Verbindungselemente gewählt und die Reproduzierfähigkeit der Montageparameter richtig eingeschätzt, so wirkt sich dies positiv auf die Störanfälligkeit im Betrieb aus.
- **Sorgfältige Planung der automatisierten Lösung:** Eine adäquate Anpassung der automatisierten Lösung an die Begebenheiten ist von großer Bedeutung. Die Prozessparameter müssen reproduzierbar sein.
- **Sicherstellung konsistenter Eigenschaften der Füge Teile:** Stabile Werkstoffeigenschaften und die Einhaltung der vorgegebenen Toleranzen bei den Füge teilen sind sicherzustellen.
- **Sicherstellung konsistenter Eigenschaften der Verbindungselemente:** Ebenso sind Material- und Oberflächenfehler, Fremdteile und geometrische Fehler bei Verbindungselementen zu vermeiden.

Die Sinnhaftigkeit der Einhaltung dieser Maßnahmen wird durch *Abbildung 4.11* unterstrichen. Viele der Empfehlungen können bereits in der Konstruktionsphase umgesetzt werden. Gleichzeitig ist diese Phase hauptverantwortlich für die Kosten. Durch geschickte Umsetzung der Maßnahmen entsteht ein großes Kostensenkungspotential.

Interessant ist auch, dass 70% der Kosten durch die Montage verursacht werden. Dies hat folgende Gründe [20]:

- steigende Variantenzahl
- immer kleinere Produktionslosgrößen
- erhöhte Kosten der Montageoperationen
- erhöhte Platzkosten
- gestiegene Personalkosten

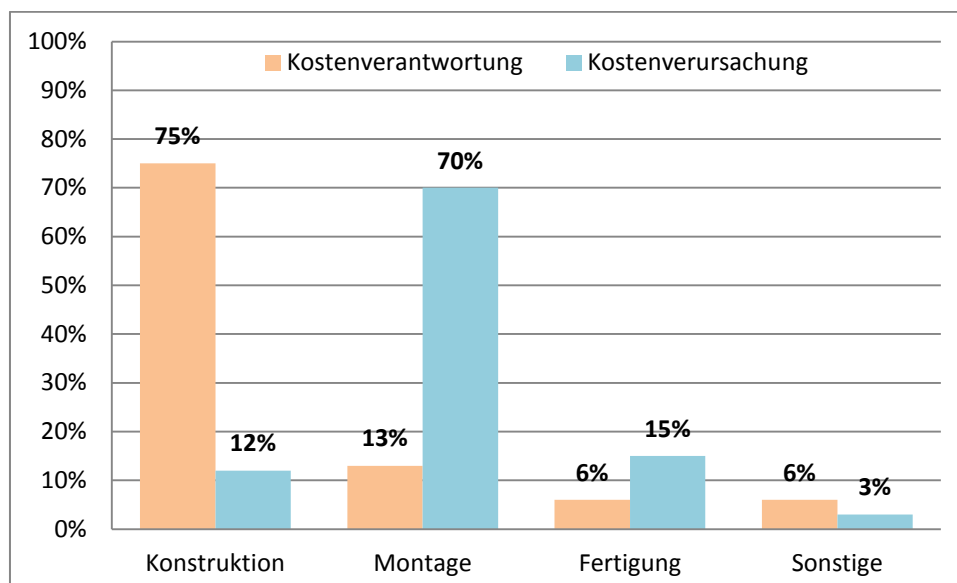


Abbildung 4.11 - Kostenverantwortung und -verursachung eines Produktes [3]

5 Vorgehensmodell zur Prozessoptimierung

5.1 Zweck / Ziele

Ziel ist es ein Modell zu entwickeln, das es ermöglicht einen Arbeitsplatz einer Fließbandmontage mit einer Taktzeit im niedrigen Minutenbereich strukturiert und zielgerichtet zu analysieren und auf Automatisierbarkeit zu prüfen. Konkret soll es dabei darum gehen, dass Arbeitsschritte bei denen manuell oder mechanisiert der Prozess "Schrauben" ausgeführt wird, bewertet und mit einer automatisierten Lösungen verglichen werden.

Bei richtiger Anwendung soll das Modell dem Produktionsleiter bzw. dem Verantwortlichen eine solide und objektive Entscheidungsbasis liefern, ob es sinnvoll ist an einem Arbeitsplatz automatisiert zu verschrauben. Dies soll hinsichtlich Datenerhebung und Zeitaufwand in möglichst geringer Zeit möglich sein.

5.2 Randbedingungen des Modells

Betrachtet man die Ziele aus Kapitel 5.1 ergeben sich unmittelbar die Randbedingungen für das Modell.

1. Einfache und unkomplizierte Datenerhebung: Dem Anwender des Modells muss es möglich sein in kurzer Zeit die nötigen und relevanten Daten zu sammeln. Dies soll ein regelmäßiges Anwenden ermöglichen und den gesamten Zeitaufwand minimieren.
2. Eindeutige und zuverlässige Ergebnisse: Die gewonnenen Ergebnisse sollen auf soliden Beinen stehen, die Lösungsvarianten eindeutig miteinander vergleichbar machen und den Verantwortlichen erlauben darauf basierend optimale Entscheidungen zu treffen.
3. Gute Nachvollziehbarkeit: Die Ergebnisse müssen mit wissenschaftlichen Methoden unterlegt werden.
4. Eindeutige Vorgehensweise: Die einzelnen Schritte müssen genau beschrieben werden, an Entscheidungspunkten klar erkennbar sein, wie

vorzugehen ist und außerdem müssen die Entscheidungskompetenzen klar definiert sein.

5.3 Einflussfaktoren

Im folgenden sind Faktoren aufgelistet, die entscheidend den Sinn und die Optimalität einer Automatisierung im Allgemeinen und einer automatisierten Verschraubung im Speziellen beeinflussen.

5.3.1 Einflussfaktoren auf die Automatisierung im Allgemeinen

- *Amortisationszeit bzw. Nutzungsdauer:* Je länger eine Anlage genutzt werden können soll, desto flexibler muss sie sein bzw. je flexibler eine Anlage ist, desto länger kann man sie nutzen. D.h., dass es sinnvoll ist eine automatisierte Schraubanlage so auszulegen, dass nicht nur ein Produkt, sondern auch dessen Nachfolgeprodukt ohne zu großen Adaptionsaufwand produziert werden kann.
- *Investitionskosten für eine Automatisierung:* Eine lange Nutzungsdauer und eine daraus resultierend flexibler zu gestaltende Anlage haben aber zufolge, dass die Anlage komplexer wird und daher in der Regel auch teurer. Zu den Investitionskosten zählen auch die Kosten, die für die Integration des Roboters anfallen. .
- *Produktionskosten:* Oft ist der Hauptgrund einer Automatisierung die Produktion zu rationalisieren. D.h. die Produktionskosten pro Stück sollten zumindest gleich der manuellen Montage sein, besser geringer. Wesentlichen Einfluss auf die Produktionskosten hat das Lohnniveau der Region. D.h. in Region mit allgemein hohem Lohnniveau wird sich eine Automatisierung schneller rechnen.
- *Produzierte Menge:* Die produzierte Menge pro Jahr stellt einen wichtigen Einflussfaktor dar. Werden an einer Montagelinie viele Kleinserien hergestellt gestaltet sich eine Automatisierung ungleich schwerer, als wenn das ganze Jahr eine große Anzahl vom gleichen Produkt hergestellt wird.

- *Produktkonstruktion bzw. Eignung der Verschraubung:* Bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung kann wesentlich darauf Einfluss genommen werden, dass der Montageablauf erleichtert wird. Ob die Montage dazu geeignet ist, automatisiert ausgeführt zu werden, hängt von mehreren Faktoren ab.
- *Wartung:* Maschinen und Roboter müssen gewartet werden. Dies erfordert Mitarbeiter, die diese Wartungsarbeiten durchführen können und Störfälle beheben können. Darüber hinaus kommt es zu Stillständen während den Wartungsarbeiten.
- *sozialer Faktor:* Manuelle Tätigkeiten belasten den Menschen unter Umständen stark. Zwar führt eine arbeiterfreundliche Gestaltung des Arbeitsplatzes und Arbeitsablaufs zu einer wesentlichen Verbesserung der Situation, dennoch bleiben, vor allem in der Fließfertigung, monotone Arbeitsabläufe oft ein Problem. Weiters gibt es Arbeitsplätze an denen vor allem eine physische Belastung vorherrscht, z.B. durch extreme Hitze, giftige Dämpfe usw. Überall hier kann eine Automatisierung eine adäquate Lösung sein.
- *Art der Fertigung:* Wesentlichen Einfluss hat die Art wie gefertigt wird. Damit ist gemeint, dass im Allgemeinen maschinenintensive Montage geringeres Automatisierungspotential hat als arbeitsintensive. Arbeitsintensive Montage ist mit relativ gesehen höheren Personalkosten verbunden, was sich positiv auf das Automatisierungspotential auswirkt.

5.3.2 Einflussfaktoren auf die automatisierte Verschraubung im Speziellen

Im folgenden werden die Einflussfaktoren, die speziell die automatisierte Verschraubung beeinflussen, vorgestellt. Als Grundlage wurde [3] herangezogen. Eine Einteilung erfolgt ähnlich wie in [28] in drei Kategorien:

- Werkstückmerkmale

- Prozessmerkmale
- Materialbereitstellung

Im folgenden wird genau auf diese drei Begriffe eingegangen und wie diese zu behandeln sind:

1. *Werkstückmerkmale:*

Unter Werkstückmerkmalen sind laut [28] Eigenschaften gemeint, die mit den Füge- und Basisteilen zu tun haben. Die Zugänglichkeit des Fügeortes oder die Eigenschaften des Fügeteils sind beispielsweise hier einzuordnen. Ein schlaffer Kabelbinder ist z.B. schwieriger zu handhaben als ein Bolzen. Ein Roboter braucht zur Handhabung zusätzliche Hilfen. Ebenso kann es sein, dass ein spezieller Roboter benötigt wird, falls eine Fügestelle schwer zugänglich ist, was sich verständlicher Weise auf die Anschaffungskosten auswirkt. Folgende Merkmale werden berücksichtigt:

i. Zugänglichkeit des Fügeortes

Wie leicht ist der Fügeprozess? Ist eine ausreichende Zugänglichkeit gegeben? Je schwerer dieser Prozess ist, desto schwieriger wird die Automatisierung, bzw. kann dies eine komplizierte Speziallösung erfordern, welche mit hohen Kosten verbunden ist und somit eine Automatisierung möglicherweise unrentabel macht.

ii. Anzahl der verschiedenen Kopfformen

Die Summe der verschiedenen Kopfformen hat wesentlichen Einfluss auf den Schraubroboter. Für jeden Kopftyp wird ein eigenes Werkzeug bzw. eine spezielle Nuss benötigt. Sind an einer Arbeitsstation Schrauben mit verschiedenen Kopftypen zu verschrauben, so bedeutet dies, dass ein Werkzeugwechsel notwendig ist. Von der technischen Realisierbarkeit her stellt dies kein Problem dar, da Werkzeugwechsel aber eine gewisse Zeit benötigen, kann es sein dass die geforderte

Taktzeit nicht eingehalten werden kann und somit wäre eine automatisierte Lösung unakzeptabel. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken, ist zu prüfen, ob die Anzahl der Kopftypen reduziert werden kann.

2. Prozessmerkmale:

Ein weiterer wichtiger Punkt betrifft die Füge- und Handhabungsprozesse. Befinden sich die Fügepositionen immer an der vorgegebenen Stelle? Ist ein Werkzeug ausreichend oder müssen bedingt durch Vielfalt mehrere Werkzeuge gehandhabt werden, d.h. muss ein Werkzeugwechsel während eines Arbeitsschrittes gemacht werden. Es ist leicht nachvollziehbar, dass die Antworten auf diese Fragen wesentlichen Einfluss auf die spätere Automatisierung haben. [28] Folgende Punkte müssen beachtet werden:

i. Toleranzen beim Fügevorgang

Sind die anzuziehenden Schrauben immer an derselben Stelle? Damit ist gemeint, ob der Roboter den Kopf der Schraube innerhalb einer Produktvariante immer an der derselben Stelle findet, oder ob sich durch Toleranzen in der Produkttransportation bzw. Produkthanlieferung die Fügeposition von Prozess zu Prozess ändert. Sind solche Toleranzen im Montagesystem vorhanden, so müssen zumindest repräsentative Abweichungen ermittelt und dem Roboterhersteller mitgeteilt werden. Dieser muss dann darüber entscheiden, ob spezielle Zusatzprozesse notwendig sind, um eine eindeutige Lage zu bestimmen.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass selbst wenige Millimeter an Lagetoleranzen dazu führen können, dass Schrauben nicht mehr "gefunden" werden können. D.h. Lagetoleranzen führen zu einer Verkomplizierung der Automatisierungslösung und senken somit das Automatisierungspotential.

ii. Prozesszeit

An jeder Arbeitsstation steht eine bestimmte Zeit zur Erledigung der Arbeitsaufgaben zur Verfügung, die Bearbeitungszeit T_{BA} . Diese ergibt sich durch eine Verminderung der Taktzeit T_{Takt} um die Zeit T_{Bef} , die benötigt wird bis das Erzeugnis durch das Fließband bis zum nächsten Arbeitsplatz zu befördert wird, wie in *Formel 6* gezeigt.

$$T_{Takt} - T_{Bef} = T_{BA}$$

Formel 6: Bearbeitungszeit

Während der Bearbeitungszeit werden verschiedenste Arbeitsaufgaben erledigt. Für die Methodik ist der zeitliche Anteil t_{SP} der Schraubprozesse an der Bearbeitungszeit interessant.

$$T_{BA} - T_{Rest} = T_{SP}$$

Formel 7: Prozesszeit Schrauben

$$t_{SP} = \frac{T_{SP}}{T_{BA}} * 100\%$$

Formel 8: Zeitlicher Anteil der Schraubprozesse

mit	T_{SP}	Zeit, die für die Erledigung der Schraubprozesse benötigt wird
	T_{Rest}	Zeit, die für die Erledigung der restlichen Arbeitsaufgaben benötigt wird

iii. Sicherheitsanforderung

Schrauben mit dem richtigen Anzugmoment festzuziehen ist dringend notwendig, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten. Im Gegensatz zu einer manuell oder mechanisiert angezogenen Schraube, ist das Anzugmoment mit einem Schraubroboter genau einzuhalten und hervorragend reproduzierbar. Zusätzlich geht eine Automatisierung meist mit einer digitalen Drehmomentüberwachung und -dokumentierung einher, was wesentlich zu einer Senkung des Fehlerniveaus führt. Je kritischer eine Schraube bezüglich Sicherheitsanforderungen ist, desto sinnvoller ist es automatisiert zu verschrauben.

Die Norm VDI 2862 unterscheidet dabei folgende Kategorien: [29]

- Kategorie A: Ein Versagen der Schraubverbindung führt mit hoher Wahrscheinlichkeit dazu, dass das Produkt zerstört wird bzw. dass Leib und Leben in Gefahr sind.
- Kategorie B: Ein Versagen der Schraubverbindung führt zu einer Funktionsbeeinträchtigung des Produktes.
- Kategorie C: Ein Versagen der Schraubverbindung führt zu Unzufriedenheit beim Kunden.

3. Materialbereitstellung

Weiters ist die Art wie die Schrauben zugeführt werden ein wesentlicher Faktor. Ist es möglich die Schrauben automatisiert zuzuführen oder macht eine zu große Vielfalt eine solche Lösung zu komplex und zu teuer. Unter Umständen muss ein komplett neues Zuführungssystem bzw. -konzept entwickelt werden. [28] Folgende Faktoren beeinflussen die Materialbereitstellung:

i. Anzahl der verschiedenen Schraubenlängen

Analog zum vorherigen Punkt hat die Summe der verschiedenen Schraubenlängen auch bedeutenden Einfluss. Eine große Vielfalt wirkt sich zwar nicht direkt auf den Roboter selbst aus, sehr wohl aber auf eine automatisierte Schraubenzuführung. Je größer die Anzahl, desto mehr Platz muss für diese Anlage eingeplant werden. Um diesem Problem entgegenzuwirken sollte überprüft werden, ob eine Vereinheitlichung der Schraubenlängen möglich ist. Ist dies nicht möglich, so kann ein Vorstecken der Schrauben in eine vorgelagerten Arbeitsstation passieren.

ii. Längen-Durchmesser-Verhältnisses

Automatisiertes Zuführen der Schrauben ist nur in einem gewissen Bereich sinnvoll. Liegt das Längen-Durchmesser-Verhältnis außerhalb von $L/d = 2$ bis 10 kann es zu häufig auftretenden Prozessstörungen kommen. [6]

5.4 Aufbau der Methodik

Das Modell besteht aus sechs Phasen bzw. Abschnitten, die nacheinander auszuführen sind. Nach jedem Abschnitt wird überprüft, ob die Arbeitsstationen die Aufstiegskriterien erfüllen, um in den nächsten Abschnitt zu gelangen. Bei Nichterfüllung scheidet die Station aus und wird in weiterer Folge nicht mehr berücksichtigt. Wird beispielsweise in Abschnitt 2 festgestellt, dass eine automatisierte Verschraubung an einem Arbeitsplatz keinen Sinn hat, so erreicht dieser Abschnitt 3 und die Folgenden nicht mehr.

Abbildung 5.1 visualisiert den Prozess. Es werden alle Arbeitsstationen in der Methodik behandelt. Je höher der Abschnitt, desto weniger Station bleiben über und desto mehr Informationen werden benötigt.

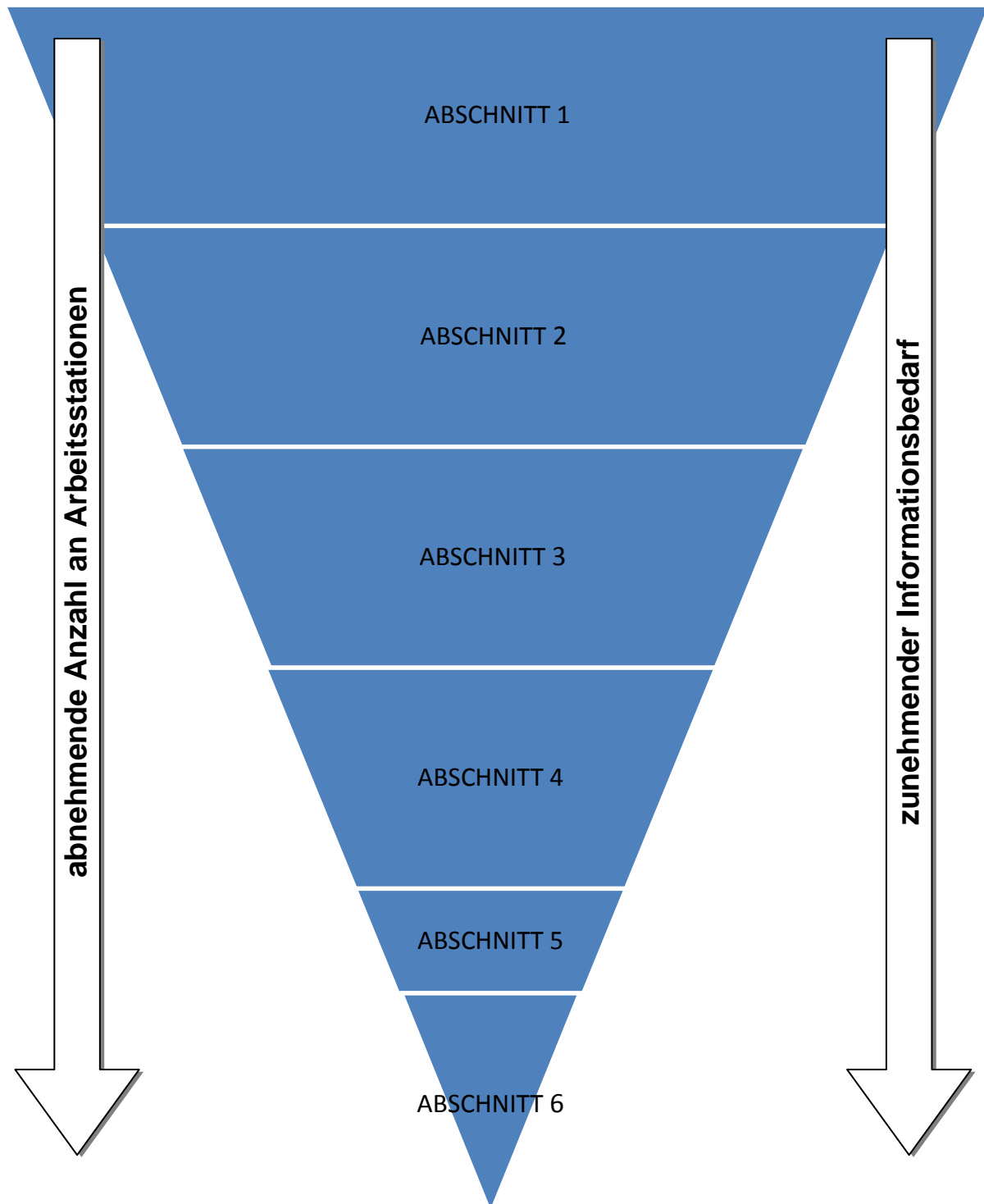


Abbildung 5.1- Aufbau der Methodik

In Abschnitt 1 werden erste Vorüberlegungen angestellt. Die Montagelinie wird allgemein analysiert und die Arbeitsplätze werden definiert bzw. erhalten einen Namen. In dieser Phase kommt es noch zu keiner Aussortierung von zu betrachtenden Stationen. Abschnitt 2 beschäftigt sich mit einer genaueren Analyse

der bestehenden Situation. Es werden Stationen gefiltert, bei denen der Anteil an Schraubaufgaben relativ zu anderen Stationen gesehen, gering ist und so eine erste Auswahl bzw. Vorselektion durchgeführt. Abschnitt 3 stellt den Kern der Methodik dar. Es wird das Automatisierungspotential der Stationen auf Grund von verschiedenen Einflussfaktoren ermittelt. Ist das Potential hoch genug, wird in Abschnitt 4 ein Lastenheft erstellt und anschließend ein Auftragnehmer ausgewählt. Dieser wird mit der Erstellung eines Schraubroboterkonzepts beauftragt. In Abschnitt 5 werden die derzeitigen Herstellkosten mit den potentiellen Herstellkosten nach einer Umsetzung des Konzepts verglichen. Bevor über eine Umsetzung des Projektes entschieden wird, ist im Rahmen von Abschnitt 6 eine Investitionsrechnung anzufertigen.

5.5 Abschnitt 1: Vorüberlegungen

Zieht man ein Automatisierungsprojekt in Betracht, so müssen zuerst einige Vorarbeiten angestellt und Rahmenbedingungen geklärt werden. In Abschnitt 1 werden diese allgemeinen Aspekte geklärt und so eine Basis für die weitere Vorgehensweise geschaffen. In *Abbildung 5.2* ist grafisch dargestellt welche Einflüsse auf ein Produktionssystem, im speziellen Fall ein Fließfertigungssystem, herrschen. Es werden sowohl Faktoren, die sich aus der Ausführung selbst ergeben, als auch äußere Faktoren, wie z.B. die Arbeitsmarktsituation, betrachtet. Am Ende dieses Abschnitts hat der Anwender einen ersten Überblick über die aktuelle Situation am Fließband, bzw. an den einzelnen Arbeitsstationen.

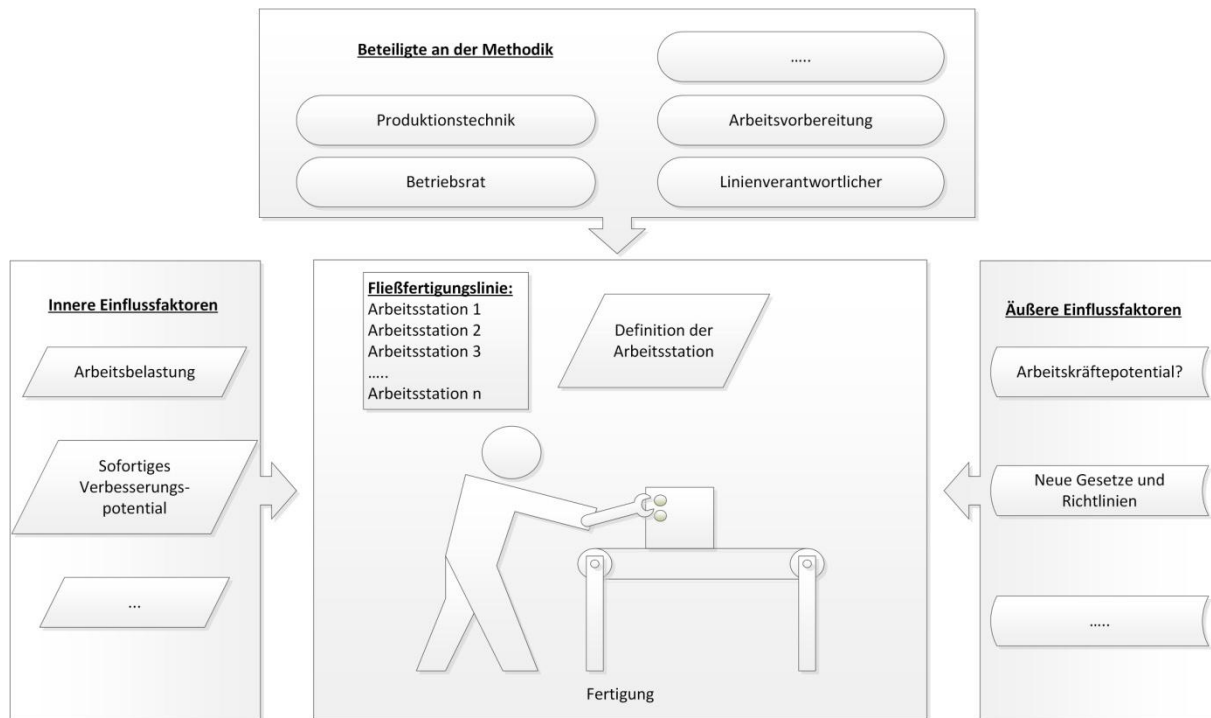


Abbildung 5.2 - Darstellung von Abschnitt 1

Im Zuge von Abschnitt 1 sind folgende Punkte und Fragen zu klären:

1. *Definition der Arbeitsstation*

Ein Erzeugnis durchläuft während der tatsächlichen Fertigung am Fließband eine gewisse Anzahl von Arbeitsstationen. Eine Arbeitsstation ist im weiteren Verlauf der Methodik eine Betrachtungseinheit die als solche analysiert wird. An jeder Station werden gewisse Tätigkeiten und Teilaufgaben erfüllt. Sind alle Stationen durchlaufen ergibt sich ein fertiges Produkt, welches nicht zwingend ein Endprodukt für den Kunden sein muss, sondern auch für einen nachgelagerten "Kunden" im Unternehmen oder ein anderes Unternehmen sein kann.

2. *Gibt es eine aktuelle MTM-Analyse der Montagelinie?*

Zur Bewertung der Montagelinie ist eine MTM-Analyse überaus nützlich. Es wird möglich "Schwachstellen" in der Montage bzw. Fertigung zu identifizieren.

Weiters enthält die Analyse Informationen über den zeitlichen Schraubanteil je Arbeitsstation, welcher im weiteren Verlauf der Methodik noch benötigt wird.

3. *Gibt es einfache Maßnahmen zur sofortigen Verbesserung?*

Um eine aussagekräftige Analyse einer Arbeitsstation durchführen zu können bzw. eine Verbesserung durch eine Automation bewerten zu können, müssen zuerst alle Arbeitsstationen daraufhin geprüft werden, ob es einfache Maßnahmen gibt, die sofort umgesetzt werden können und zu einer sofortigen Verbesserung führen.

Bei diesen Maßnahmen kann es sich z.B. um logistische Prozesse handeln, wie Materialbereitstellung o.ä. Es ist leicht einzusehen, dass derartige Verbesserungen auch für eine automatisierte Lösung zwingend notwendig sind.

4. *Sind an der Fertigungslinie Produktionsänderungen bereits geplant bzw. in naher Zukunft absehbar?*

Sind wesentliche Änderungen bereits geplant, so macht es keinen Sinn für das bestehende System eine Automatisierung durchzuführen. Darunter ist z.B. eine veränderte Anzahl an Arbeitsstationen der Montagelinie zu verstehen. Falls die konkreten Änderungen feststehen, besteht die Möglichkeit die Methodik für die geänderte Fertigungslinie anzuwenden.

5. *Gibt es einen Arbeitskräftemangel an der jeweiligen Montagelinie bzw. gibt es Arbeitsstationen für die es besonders schwierig ist Arbeitskräfte zu finden?*

Wie sieht es in der betreffenden Region mit geeigneten Arbeitskräften aus? Eine Automatisierung kann Mitarbeiter einsparen und so eventuelle Engpässe ausgleichen.

6. *Sind neue Gesetze und Arbeitsrichtlinien absehbar für die Arbeitsausführung an der jeweiligen Montagelinie/Arbeitsstation?*

Ist in Zukunft mit Änderungen zu rechnen, was Arbeitssicherheit angeht? Wirken sich diese auf bestehende Anlagen aus, d.h. wird es notwendig sein bestehende Anlagen anzupassen. Im Extremfall kann dies dazu führen, dass eine manuelle Ausführung einer bestimmten Tätigkeit aus verschiedensten Gründen (z.B.: Arbeitssicherheit) nicht mehr erlaubt ist.

7. *Sind bestehende Lösungen zukunftssträftig bzw. sind die Verantwortlichen mit der Lösung zufrieden?*

Sind bestehende Lösungen aktuell bzw. entsprechen den Vorstellungen der Verantwortlichen? Oder wurden erst vor kurzem bestimmte Arbeitsstationen automatisiert o.ä.? Sollte dies der Fall sein, macht es wenig Sinn eine weitere Analyse durchzuführen.

5.5.1 Handlungsablauf

Der Ablauf erfolgt wie in *Abbildung 5.3 - Vorüberlegungen; Bezeichnungen 1-7* *bezugnehmend auf Kapitel* dargestellt

Zu Beginn werden alle Arbeitsstationen im Rahmen der Beantwortung von Punkt 1 erfasst und definiert. Die Definition hat für die ganze Methodik Gültigkeit und wird eventuell erweitert.

Ist Frage 2 mit *ja* zu beantworten, so sind die Unterlagen der MTM-Analyse zu sammeln, da diese im weiteren Verlauf der Methodik, zumindest für gewisse Stationen, benötigt wird. Falls noch keine MTM-Analyse vorliegt, so ist von den Verantwortlichen zu entscheiden, ob eine solche gemacht werden soll. Falls ja, ist diese von einem qualifizierten Mitarbeiter für die gesamte Montagelinie durchzuführen. Einige Informationen der MTM-Analyse sind in einem späteren Stadium der Methodik notwendig. Darüber hinaus erlaubt eine komplette Analyse eine bessere Bewertung der Montagelinie und Beantwortung der Frage 3. Wird

entschieden die MTM-Analyse nicht durchzuführen wird ebenfalls mit der Frage 3 fortgefahren.

Frage 3 soll klären, ob es einfache und auf der Hand liegende Verbesserungsmaßnahmen gibt und ob diese sofort durchgeführt werden können. Falls ja, sind diese umzusetzen bevor man mit der Methodik fortfährt. Ist dies nicht möglich, muss die Methodik abgebrochen werden bzw. kann erst wieder fortgesetzt werden, wenn die Verbesserungen ausgeführt worden sind. Dabei sind für den Fall, dass eine MTM-Analyse vorliegt auch diese Daten zu untersuchen. Sind die Verbesserungen umgesetzt kann sofort fortgefahren werden. Diese Vorgehensweise wird nachvollziehbar wenn man bedenkt, dass z.B. ein logistisches Problem durch eine automatische Verschraubung nicht gelöst wird und noch immer ein Problem ist.

Muss Frage 4 mit *ja* beantwortet werden, so ist die Methodik abubrechen. Eine bevorstehende wesentliche Änderung kann dazu führen, dass eine Automatisierung einer Arbeitsstation sinnlos wird. Es obliegt dabei der Expertenrunde abzuschätzen, ob Veränderungen abzusehen sind und wie stark sich dies auf die Montagelinie auswirkt. Sind keine Änderungen absehbar, oder nur kleine Umstellungen, wird mit Frage 5 fortgefahren.

Ist eine oder beide der Fragen 5 und 6 für eine Arbeitsstation mit *ja* zu beantworten, ist dies zu dokumentieren und die Stationsdefinition mit einem "*" zu kennzeichnen. Eine Kennzeichnung führt am Ende von Abschnitt 3, falls zwei Stationen das gleiche Automatisierungspotential haben, dazu dass die gekennzeichnete Station höher gereiht wird.

Abschließend ist Frage 7 zu beantworten. Wenn die Frage für eine Arbeitsstation mit *ja* zu beantworten ist, so wird diese im weiteren Verlauf der Methodik nicht mehr behandelt. Falls dies von den Verantwortlichen gewünscht wird, wird die Methodik für die Stationen weitergeführt. Im Falle einer Beantwortung mit *nein* wird die Methodik mit dem Abschnitt 2 fortgesetzt.

Die Dokumentation des ersten Abschnitts kann in einem beliebigen dafür geeigneten Format erfolgen. Als sinnvolle Möglichkeit wird im Rahmen dieser Arbeit mit Tabellen gearbeitet. *Tabelle 1* zeigt wie dies aussehen kann.

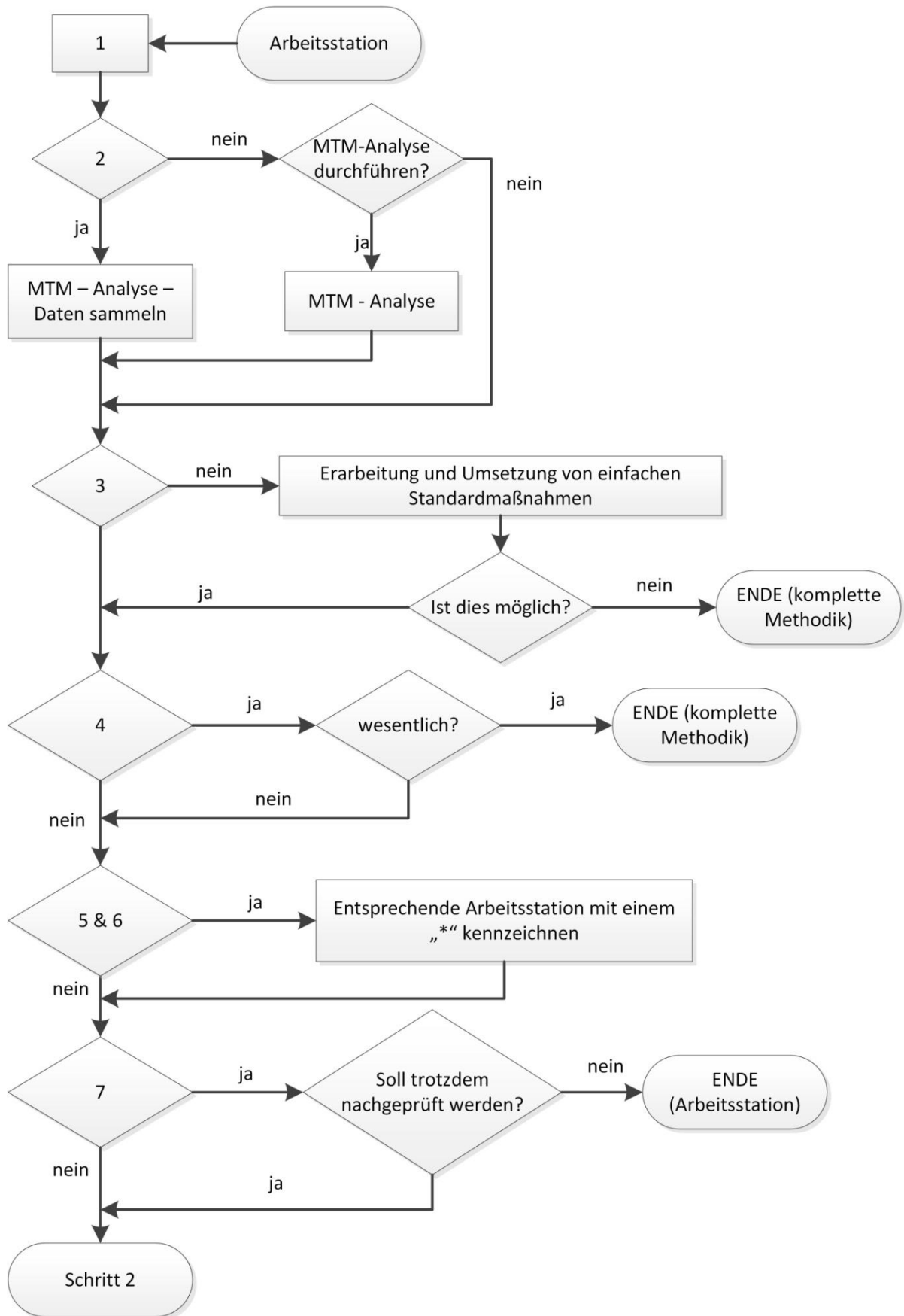


Abbildung 5.3 - Vorüberlegungen; Bezeichnungen 1-7 bezugnehmend auf Kapitel 5.5

5.5.2 Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen

Um alle nötigen Informationen sammeln zu können bzw. die Fragen beantworten zu können, müssen im Rahmen dieses Abschnitts Personen beteiligt werden, die Zugang zu eben diesen Informationen haben. Eine genaue Kenntnis über die Fertigung, die Arbeitsstationen und die produzierten Produkte ist dabei Grundvoraussetzung. Verantwortliche aus der Produktionstechnik und der Arbeitsvorbereitung sowie der Linienverantwortliche müssen anwesend sein. Zusätzlich ist jemand aus der Personalabteilung, zur Beurteilung der Arbeitsmarktsituation, und der Betriebsrat für Fragen bezüglich Arbeitsbedingungen heranzuziehen. Diese Gruppe muss sich im Rahmen eines Expertengesprächs mit den zu beantwortenden Fragen auseinander setzen. Die Beteiligung mehrerer Personen soll sicherstellen, dass subjektive Entscheidungen im Rahmen einer Gruppenentscheidung soweit wie möglich ausgeschlossen werden können. Persönliche Präferenzen einzelner Verantwortlicher fallen somit weniger ins Gewicht.

Falls eine MTM-Analyse durchgeführt wird, muss dies von einem qualifizierten Mitarbeiter erledigt werden.

5.5.3 Beispiel

Im folgenden soll anhand eines kurzen Beispiels der Aufbau der Excel-Tabelle erklärt werden.

Im Beispiel wird ein Produkt in Fließfertigung an 13 Stationen hergestellt, daher 13 Zeilen mit dem Namen der jeweiligen Station. In der obersten Zeile stehen die Fragen, welche beantwortet werden müssen. Entsprechend der Beantwortung wird ein *ja* oder *nein* in die betreffende Spalte gesetzt.

Beispielsweise wird Frage 5 für Stand 05 mit *ja* beantwortet. Dies führt zu einem Eintrag *ja* im entsprechenden Feld und zu einer Markierung "*" beim Namen des Standes, wie der Pfeil in *Tabelle 1* andeutet. Weiters führt die negative Beantwortung der Frage sieben für Stand 11 dazu, dass die entsprechende Zeile rot markiert wird, was hervorheben soll, dass diese Station aus der Methodik ausscheidet.

Definition / Name	Frage 5	Frage 6	Frage 7
Stand 01	nein	nein	nein
Stand 02	nein	nein	nein
Stand 03	nein	nein	nein
Stand 04	nein	nein	nein
Stand 05 **	ja	ja	nein
Stand 06	nein	nein	nein
Stand 07	nein	nein	nein
Stand 08 *	ja	nein	nein
Stand 09	nein	nein	nein
Stand 10	nein	nein	nein
Stand 11	nein	nein	ja
Stand 12	nein	nein	nein
Stand 13	nein	nein	nein

Tabelle 1 - Beispiel: Dokumentation Abschnitt 1

5.6 Abschnitt 2: Vorselektion

Diese Methode soll für verschiedenste Erzeugnisse, die in Fließbandmontage hergestellt werden, gültig sein. Das Hauptaugenmerk liegt auf den Schraubprozessen, jedoch kann es sein, dass auch andere Prozesse an der Montagelinie gut automatisierbar sind. Abschnitt 2 dient dazu Arbeitsstationen, die für eine automatisierte Verschraubung ungeeignet sind, weil z.B. keine Schraubprozesse zu erledigen sind, in einem frühen Stadium auszusortieren. Die aussortierten Stationen können trotzdem gut automatisierbar sein. Dies wird in einem gesondertem Arbeitsschritt kurz analysiert.

Zur Analyse einer Arbeitsstation eignet sich der Standardarbeitsplan. Dieser enthält Informationen über die zu erledigenden Arbeitsschritte, eine Beschreibung dieser und Montagehinweise.

5.6.1 Handlungsablauf

Es ist wie in *Abbildung 5.4* dargestellt vorzugehen.

Zunächst müssen von den Verantwortlichen die Aufstiegskriterien bestimmt werden. Jedenfalls scheiden solche Stationen aus, an denen nicht geschraubt wird, da hier eine automatisierte Verschraubungslösung nicht möglich ist. Darüber hinaus ist es möglich verschiedene Kriterien zu wählen, wie z.B.:

- alle Stationen an denen weniger als vier Schrauben festgezogen werden, scheiden aus
- die zehn Stationen an denen die meisten Schraubprozesse zu erledigen sind, kommen in *Teil 2*

Danach werden Informationen über die Anzahl der Schraubprozesse für die jeweilige Arbeitsstation gesammelt. Dazu werden, wie bereits beschrieben, die jeweiligen Arbeitspläne der Stationen benötigt.

Danach werden die Stationen nach Anzahl der Schraubprozesse gereiht. Je höher die Anzahl, desto höher wird die Station gereiht.

Anschließend sind folgende Fragen zu klären:

a) Erfüllt die Arbeitsstation die Aufstiegskriterien?

Falls die Station die Kriterien erfüllt, gelangt diese sofort in Abschnitt 3. Werden die Kriterien nicht erfüllt, muss mit der Beantwortung folgender Frage fortgefahren werden.

b) Treten an der Arbeitsstation Prozesse, die leicht automatisierbar sind, häufig auf?

Ein Mitarbeiter, der Erfahrung hat mit Automatisierungsprojekten oder ein extra dazu zusammengestelltes Team bewerten das Automatisierungspotential der verbleibenden Stationen. Wird ein solches erkannt, so ist dies jedenfalls zu dokumentieren. Für diesen Fall liefert diese Methodik keine Vorgehensweise. Weitere Schritte müssen von den Verantwortlichen erarbeitet werden. In diesem Fall und auch für den Fall, dass

kein Automatisierungspotential erkannt wird, endet die Methodik für die Station hier.

Die gesammelten Ergebnisse sind zu dokumentieren. Wie im vorhergehenden Abschnitt ist ein beliebiges dafür geeignetes Format zu wählen. Beispielsweise kann die in *Tabelle 1* gewählte Vorgehensweise mit den Informationen erweitert werden.

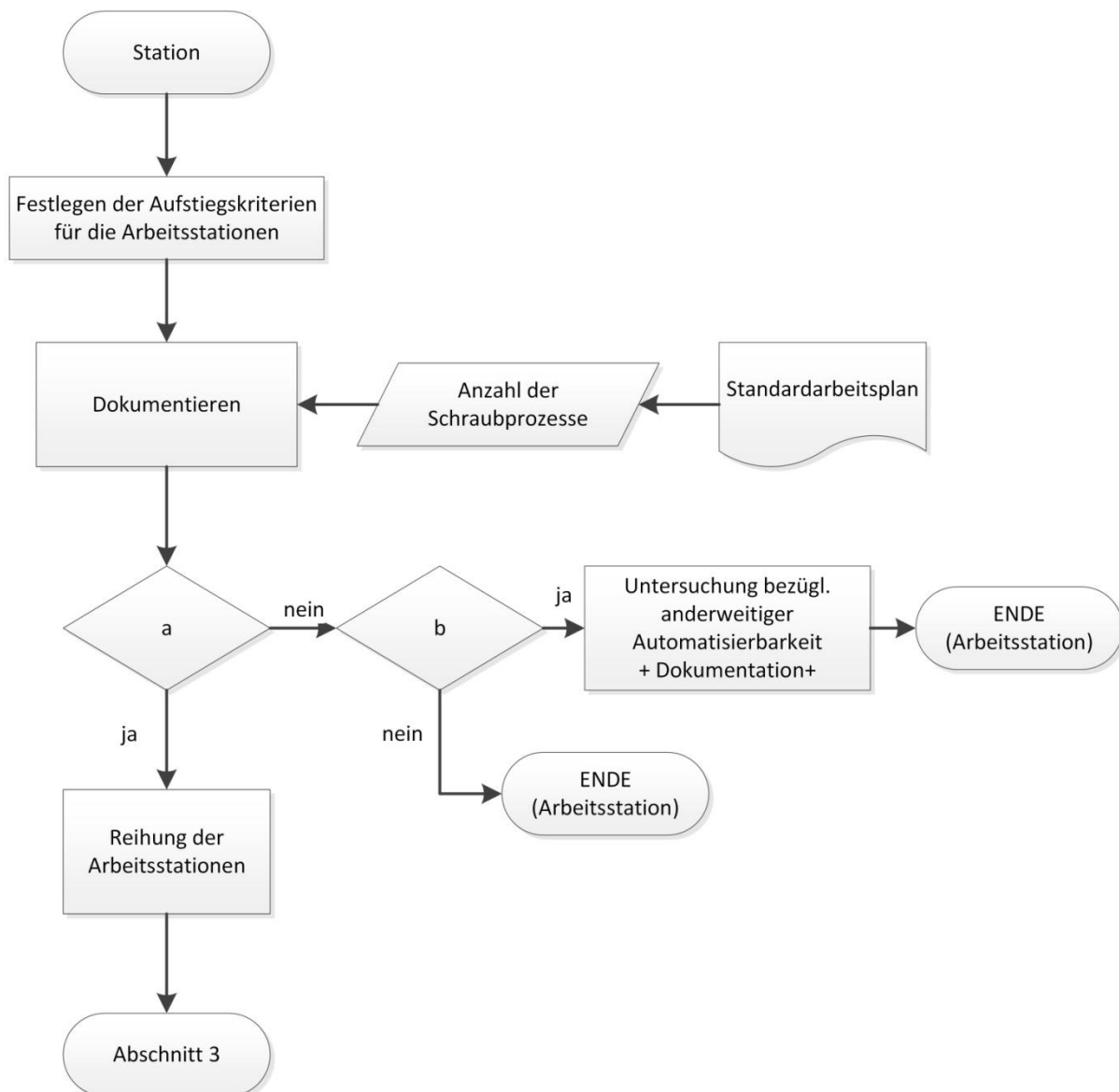


Abbildung 5.4 - Vorselektion; Bezeichnungen a und b bezugnehmend auf Kapitel 5.6

5.6.2 Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen

Anders als in Abschnitt 1 wird für den Abschnitt 2 kein speziell geschultes bzw. erfahrenes Personal benötigt. Die Hauptarbeit kann von einem Mitarbeiter erledigt werden, der mit der Produktionslinie vertraut ist.

Die Aufstiegskriterien müssen von einem Linienvorstandlichen, dem Produktionsleiter oder von einem Team, das für das Automatisierungsprojekt zusammengestellt wurde, bestimmt werden. Weiters muss, wie oben bereits erwähnt, die Bewertung der aussortierten Stationen von einem Mitarbeiter erfolgen, der bereits Erfahrung mit Automatisierungsprojekten hat.

5.7 Abschnitt 3: Automatisierungspotentialanalyse

Abschnitt 3 stellt den Kern der Methodik dar. Dabei wird das Automatisierungspotential jeder noch übrig gebliebenen Station ermittelt, basierend auf sieben Einflussfaktoren. Je höher das Potential desto leichter, wirtschaftlicher und effektiver ist eine automatisierte Verschraubung. Die Bewertung jedes Faktors führt nach einem vorgegebenen System zu eine Punktevergabe. Je kleiner die Anzahl der Punkte, desto größer ist das Automatisierungspotential. Zusätzlich gibt es Ausschlusskriterien, die dazu führen, dass eine Station als "nicht- oder schwer-automatisierbar" gekennzeichnet wird und somit von einer Automatisierung abgeraten wird. Dies kann z.B. so weit gehen, dass sechs der sieben Einflussfaktoren günstig bewertet werden, es aber trotzdem kein Automatisierungspotential gibt, wenn z.B. die Anzahl der verschiedenen Schraubenkopfformen zu hoch ist.

Die tatsächliche Bewertung läuft für jeden Einflussfaktor gleich ab. Es werden Punkte von eins bis drei verteilt, wobei eins für "gut geeignet" und drei für "schlecht geeignet" vergeben wird. Weiters sind nicht alle Einflussfaktoren gleich wichtig, was mit einem Gewichtungsfaktor berücksichtigt wird. Faktoren, die wichtiger sind, haben einen höheren Gewichtungsfaktor.

5.7.1 Einflussfaktoren

Faktoren, die die automatisierte Verschraubung beeinflussen:

Die Faktoren sind in Kapitel 5.3 beschrieben.

a) *Zugänglichkeit des Fügeortes*

Es müssen die Fügebedingungen untersucht werden. Dies ist von jemandem durchzuführen, der schon Erfahrung mit Verschraubungsautomatisierung besitzt und die vorherrschenden Bedingungen abschätzen kann. Für schwer zugängliche Fügstellen ist es sehr wahrscheinlich, dass Sonderkonstruktionen der Werkzeuge notwendig sind, was eine einfache Automatisierung unwahrscheinlicher macht. *Tabelle 2* stellt den Zusammenhang zwischen der Zugänglichkeit und dem Zuteilungsfaktor Z_1 her.

Zugänglichkeit	Zuteilungsfaktor Z_1
leicht	1
mittel	2
schwer	3

Tabelle 2 - Zugänglichkeit: Zuteilungsfaktor Z_1

b) *Anzahl der verschiedenen Kopfformen*

Es sind Informationen über die Anzahl der verschiedenen Schraubenkopfformen je Station zu sammeln. *Tabelle 3* stellt den Zusammenhang zwischen der Summe der Kopfformen und dem Zuteilungsfaktor Z_2 her.

Die Informationen sind aus dem Arbeitsplan der jeweiligen Station zu entnehmen.

Anzahl der verschiedenen Kopfformen	Zuteilungsfaktor Z_2
1	1
2	2
3	3
>3	X

Tabelle 3 - Anzahl der verschiedenen Kopfformen: Zuteilungsfaktor Z_2

c) *Toleranzen beim Fügevorgang*

Tabelle 4 stellt den Zusammenhang zwischen den vorhandenen Lagetoleranzen und dem Zuteilungsfaktor Z_3 her.

Es ist ein geeignetes Verfahren zur Ermittlung der Toleranzen zu wählen. Im Kapitel 6.1.3 dieser Arbeit wurden mit einer Kameraapplikation und einer Fotoauswertungssoftware die Lagetoleranzen ermittelt.

Lagetoleranzen	Zuteilungsfaktor Z_3
keine ($\pm 0-1\text{mm}$)	1
gering ($\pm 1-3\text{mm}$)	2
hoch ($\geq \pm 3\text{mm}$)	3

Tabelle 4 - Lagetoleranzen: Zuteilungsfaktor Z_3

d) *Taktzeit*

Tabelle 5 stellt den Zusammenhang zwischen dem Anteil des Schraubprozesses t_{SP} an der Gesamtprozesszeit an der Arbeitsstation und dem Zuteilungsfaktor Z_4 her. Umso höher t_{SP} desto kleiner ist der Anteil an anderen Tätigkeiten an der jeweiligen Arbeitsstation. Dies führt dazu, dass diese restlichen Tätigkeiten, falls diese nicht vom Roboter erledigt werden können, auf andere Arbeitsstationen aufgeteilt werden müssen. Ideal wäre ein Anteil der Schraubprozesse von 100%.

Die Berechnung des Anteils wird in Kapitel 5.3.2 gezeigt.

Die benötigten Informationen sind einer MTM-Analyse der jeweiligen Station zu entnehmen.

Anteil an der Bearbeitungszeit	Zuteilungsfaktor Z_4
$t_{SP} > 80\%$	1
$50\% \leq t_{SP} \leq 80\%$	2
$t_{SP} < 50\%$	3

Tabelle 5 - Anteil an der Bearbeitungszeit: Zuteilungsfaktor Z_4

e) *Sicherheitsanforderung*

Tabelle 6 stellt den Zusammenhang zwischen den Kategorien der Sicherheitsanforderungen und dem Zuteilungsfaktor Z_5 her. Informationen über die Sicherheitskategorie können dem Kapitel 5.3 entnommen werden.

Je höher die Sicherheitsanforderungen an desto eher macht ein automatisiertes Verschrauben Sinn. Kategorie entspricht der höchsten Anforderung an die Schraubverbindung. Ein Schraubroboter macht es nicht nur möglich Fehler sofort zu erkennen und zu melden, sondern auch Schraubabläufe über einen längeren Zeitraum zu dokumentieren. Dadurch ist es möglich, falls eine Schraubverbindung im Betrieb versagt, nachzuvollziehen, ob und mit wie viel Drehmoment eine Schraube angezogen wurde, d.h. Fehler seitens der Montage können glaubhaft ausgeschlossen werden.

Sicherheits - anforderung	Zuteilungsfaktor Z_5
Kategorie A	1
Kategorie B	2
Kategorie C	3

Tabelle 6 - Sicherheitsanforderungen: Zuteilungsfaktor Z_5 Faktoren, die die automatisierte Schraubenzufuhr beeinflussen:

f) Anzahl der verschiedenen Schraubenlängen

Tabelle 7 stellt den Zusammenhang zwischen der Anzahl der verschiedenen Schraubenlängen je Arbeitsstation und dem Zuteilungsfaktor Z_6 her. Für eine Anzahl größer als 3 gibt Tabelle 7 das Sonderzeichen "#" als Zuteilungsfaktor aus. D.h. dass eine automatisierte Schraubenzuführung ab diesem Zeitpunkt nicht mehr sinnvoll ist, da der Platzbedarf dafür zu groß wäre.

Die Informationen sind dem Arbeitsplan zu entnehmen.

Anzahl der verschiedenen Schraubenlängen	Zuteilungsfaktor Z_6
1	1
2	2
3	3
>3	#

Tabelle 7 - Anzahl der verschiedenen Schraubenlängen: Zuteilungsfaktor Z_6

g) Längen-Durchmesser-Verhältnis der Schrauben

Das Längen-Durchmesser-Verhältnis hat wie in Kapitel 5.3 beschrieben wesentlichen Einfluss auf die Schraubenzufuhr. Wird dieses Verhältnis nicht erreicht wird laut Tabelle 8 ein "#" als Zuteilungsfaktor ausgegeben.

Die Informationen sind dem Produktstrukturplan zu entnehmen.

Längen - Durchmesser - Verhältnis	Zuteilungsfaktor Z_7
$2 \leq L/d \leq 10$	1
sonst	#

Tabelle 8 - Längen-Durchmesser-Verhältnis: Zuteilungsfaktor Z_7

5.7.2 Gewichtungsfaktoren

Für die Berechnung des Automatisierungspotentials werden noch Gewichtungsfaktoren, welche in aufgelistet sind, benötigt. Die Werte wurden durch Paarweise Vergleich, welcher in *Tabelle 9* dargestellt ist, ermittelt. Die Beurteilung erfolgte durch ein Experten-Team. Teil dieses Teams waren der Herr Dipl.-Ing. Klingsberger Roman von der Firma KTM, Herr Dipl.-Ing. Prüs Sebastian von der Firma KUKA Robotics und Herr Dipl.-Ing. Honsberg Ottmar ebenfalls von der Firma KUKA Robotics.

	a	b	c	d	e	f	g	Summe	Wert
a	■	0	1	0	1	1	1	4	1,1
b	2	■	2	2	1	2	2	11	3,0
c	1	0	■	0	1	0	0	2	0,5
d	2	0	2	■	1	1	2	6	1,6
e	1	1	1	1	■	0	2	6	1,6
f	1	0	2	1	2	■	1	7	1,9
g	1	0	2	0	0	1	■	4	1,1
								11	3,0
BEWERTUNG									
0	ist weniger wichtig als .								
1	ist gleich wichtig wie ...								
2	ist wichtiger als ...								
(von Zeile nach Spalte gelesen)									
Max. Wert (Referenzwert) = 3 Punkten									

Tabelle 9 - Paarweiser Vergleich Gewichtungsfaktoren; Buchstaben a-g beziehen sich auf Kapitel 5.7.1

Die Toleranzen beim Fügevorgang fallen am wenigsten ins Gewicht, da diese relativ leicht auszugleichen sind, z.B. durch ein Kamerasystem am Roboter, welches dabei hilft die Fügeposition zu finden. Selbst für große Füge toleranzen ist immer noch eine wirtschaftliche Automatisierung möglich, der Aufwand wird lediglich größer. Hingegen ist die Anzahl der verschiedenen Kopfformen stark gewichtet. Dies ist leicht verständlich, da viele verschiedene Kopfformen häufigen Werkzeugwechsel bzw. Nusswechsel bedingen. Dafür benötigt der Roboter viel Zeit. Im schlimmsten Fall so viel, dass eine Automatisierung nicht mehr möglich ist, da die Taktzeit nicht eingehalten werden kann.

<i>Einflussfaktor i</i>	<i>Gewichtungsfaktor G_i</i>
a	1,1
b	3,0
c	0,5
d	1,6
e	1,6
f	1,9
g	1,1

Tabelle 10 - Gewichtungsfaktoren

5.7.3 Berechnungsformel für das Automatisierungspotential

Berechnet wird das Automatisierungspotential mit automatisierter Schraubenzuführung $P_{mit\ SZ}$ mit der *Formel 9*.

$$P_{mit\ SZ} = \frac{\sum_{i=1}^7 Z_i * G_i}{\sum_{i=1}^7 G_i}$$

Formel 9: Automatisierungspotential (automatisierte Schraubenzuführung möglich)

Das Potential nimmt dabei Werte zwischen 1 und 3 an, wobei eins für "gut geeignet" und drei für "schlecht geeignet" vergeben wird.

Ist die Anzahl der verschiedenen Schraubenlängen an einer Arbeitsstation größer als drei, so liefert Tabelle *Tabelle 7* keinen Wert, stattdessen ein Sonderzeichen. Das Automatisierungspotential ohne automatisierte Schraubenzuführung $P_{ohne\ SZ}$ wird mit *Formel 10* berechnet.

$$P_{ohne\ SZ} = \frac{\sum_{i=1}^6 Z_i * G_i}{\sum_{i=1}^6 G_i}$$

Formel 10: Automatisierungspotential (automatisierte Schraubenzuführung nicht sinnvoll)

5.7.4 Handlungsablauf

Jede Station durchläuft den in *Abbildung 5.5* dargestellt Ablauf.

Zunächst müssen die Aufstiegskriterien bestimmt werden. Die Verantwortlichen können festlegen, welches Mindestpotential vorliegen muss, damit die Station weiter betrachtet wird. Ein Automatisierungspotential schlechter als 2,25 lässt die Station jedenfalls ausscheiden, da eine Automatisierung darunter wenig Sinn macht. Arbeitsstationen, die eine Potential von 1,75 oder besser erreichen, bieten gutes Potential für eine Automatisierung.

Ist dies erledigt, muss gecheckt werden, ob die Toleranzen für den Fügevorgang bekannt sind. Sind diese nicht bekannt ist ein geeignetes Verfahren zu wählen, um daraufhin diese Toleranzen bestimmen und auswerten zu können.

Anschließend muss geklärt werden, ob bereits eine MTM-Analyse der übrig gebliebenen Stationen vorliegt. Falls nicht, ist dies für verbleibenden Stationen durchzuführen.

Sind die vorhergehenden Fragen geklärt, müssen folgende Informationen gesammelt werden:

- Produktstrukturplan mit einer Aufschlüsselung, welche Teile an der jeweiligen Station verbaut werden
- MTM-Analyse
- Toleranzen beim Fügevorgang

Nun können die Zuteilungsfaktoren Z_i bestimmt werden. Dazu werden die Tabellen aus 5.7.1 verwendet.

Nach der Ermittlung der Zuteilungsfaktoren kann es zu drei verschiedenen Fällen kommen:

- i. Es ergeben sich keine Sonderzeichen:

In diesem Fall ist das Automatisierungspotential mit der *Formel 9* zu berechnen. Erfüllt die Station die zuvor bestimmten Aufstiegskriterien, so gelangt diese in Abschnitt 4, andernfalls scheidet die Station aus der Methodik aus.

- ii. Es wird ein "#" als Sonderzeichen ermittelt:

In diesem Fall scheidet eine automatisierte Schraubenzuführung aus, da es nicht mehr möglich ist oder der Aufwand zu groß werden würde. Das Automatisierungspotential ohne automatisierte Schraubenzuführung ist mit der *Formel 10* zu berechnen. Weiters wird dem Stationsnamen das Sonderzeichen "#" angehängt. Erfüllt die Station die zuvor bestimmten Aufstiegskriterien, so gelangt diese in Abschnitt 4, andernfalls scheidet die Station aus der Methodik aus.

- iii. Es wird ein "X" als Sonderzeichen ermittelt:

Ein erfahrener Mitarbeiter muss prüfen, ob es Sinn macht trotzdem weiter zu untersuchen. Wird negativ beurteilt, scheidet die Station aus der Methodik aus. Bei positiver Beurteilung wird mit der *Formel 10* für nicht-automatisierte Schraubenzuführung berechnet und dem Stationsnamen das Sonderzeichen "X" angehängt. Der Grund warum diese Formel verwendet wird ist, dass die große Schraubenvielfalt eine automatisierte Schraubenzuführung sehr schwierig und umständlich macht.

Erfüllt die Station die zuvor bestimmten Aufstiegsriterien, so gelangt diese in Abschnitt 4, andernfalls scheidet die Station aus der Methodik aus.

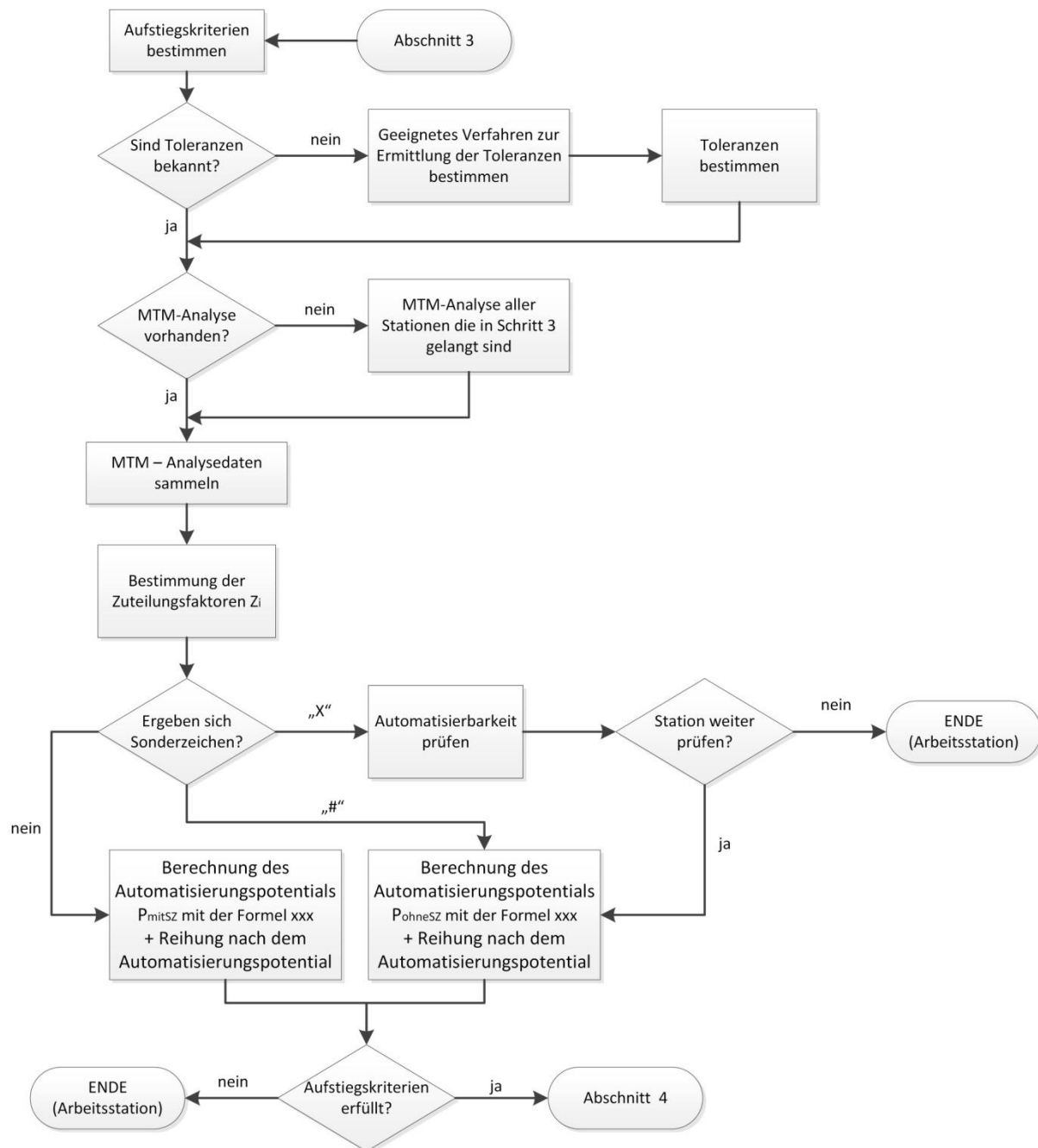


Abbildung 5.5 - Automatisierungspotentialanalyse

5.7.5 Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen

Um Abschnitt 3 adäquat ausführen zu können, ist dieser vom Produktionsleiter, einem Linienverantwortlichen oder einer dazu gebildeten Arbeitsgruppe durchzuführen. Zusätzlich ist für den Fall, dass die Toleranzen zu ermitteln sind, ein dafür qualifizierter Mitarbeiter auszuwählen. Falls auch eine MTM-Analyse nötig ist, ist diese ebenfalls von einem dafür qualifizierten Mitarbeiter durchzuführen.

5.8 Abschnitt 4: Lastenheft

Die Erstellung eines Lastenheftes stellt einen integralen Bestandteil einer Automatisierung dar. Dabei werden die Anforderungen konkretisiert und in ein standardisiertes Format gebracht, damit der Auftragnehmer darauf aufbauend ein entsprechendes Konzept entwerfen kann. Die Norm VDI/VDE 3694 liefert hierfür einen optimalen Leitfaden betreffend Inhalt und Aufbau eines Lastenheftes.

"Die Richtlinie dient zur Festlegung der technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an das Automatisierungssystem, um die Zusammenarbeit zwischen Betreiber, Planer und Hersteller zu erleichtern" [30, p. 2]

Weiters sollen die geforderten Eigenschaften "[...] *quantifizierbar und prüfbar sein*" [30, p. 3]

Im wesentlichen müssen folgende Informationen enthalten sein: [30]

- Spezifikation der geforderten Leistung
- Anforderungen an:
 - das Produkt bei dessen Verwendung und
 - den Auftragnehmer und
 - das Projektmanagement des Auftragnehmers
- Rahmenbedingungen für die zu erbringenden Leistungen
- vertragliche Konditionen

5.8.1 Handlungsablauf

Der Handlungsablauf ist laut *Abbildung 5.6* durchzuführen.

Zuerst muss von den Verantwortlichen geklärt werden welche Form des Lastenheftes gewählt wird:

- a) vollständige Anfertigung eines Lastenheftes:
 - Vorgehen nach VDI/VDE 3694
- b) "Mini"-Lastenheft: Mit dem potentiellen Auftragnehmer wird in einem Gespräch erörtert, welche Informationen benötigt werden, um eine Aussage über

relevante Aspekte machen zu können. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Fragen wie:

- Schafft der angebotene Roboter die Aufgabenstellung?
- Kann die geforderte Taktzeit eingehalten werden?

Diese zwei Fragen sind die wesentlichsten. Weitere wichtige Punkte können im Rahmen des Gesprächs diskutiert werden.

Um die für den Anwender der Methodik wesentlichen Fragen klären zu können, ist dringend anzuraten, dass der Auftragnehmer eine Machbarkeitsstudie durchführt.

Die verhandelten Themen und Entscheidungen sind zu dokumentieren.

Wird die Machbarkeit vom potentiellen Auftragnehmer als positiv bewertet, kann mit Abschnitt 5 fortgefahren werden.

Falls der Auftragnehmer im Rahmen einer Machbarkeitsstudie oder bei der Bewertung des Lastenheftes zu einer negativen Beurteilung gelangt, sprich dass das Projekt nicht umsetzbar ist, so endet hier für die entsprechende Station die Logik.

Im Rahmen dieser Methodik wird der Weg über das "Mini"-Lastenheft empfohlen. Es werden alle in dieser Phase relevanten Informationen ausgetauscht. Bewertet der potentielle Auftragnehmer das Projekt negativ, so wurde nicht zu viel Zeit für die Erstellung eines Lastenheftes verbraucht. Im Falle einer positiven Bewertung folgen die Abschnitt 5 und 6. Spätestens nach einer positiven Investitionsrechnung ist dann ein vollständiges Lastenheft anzufertigen. Dafür liefert das "Mini"-Lastenheft eine solide Grundlage.

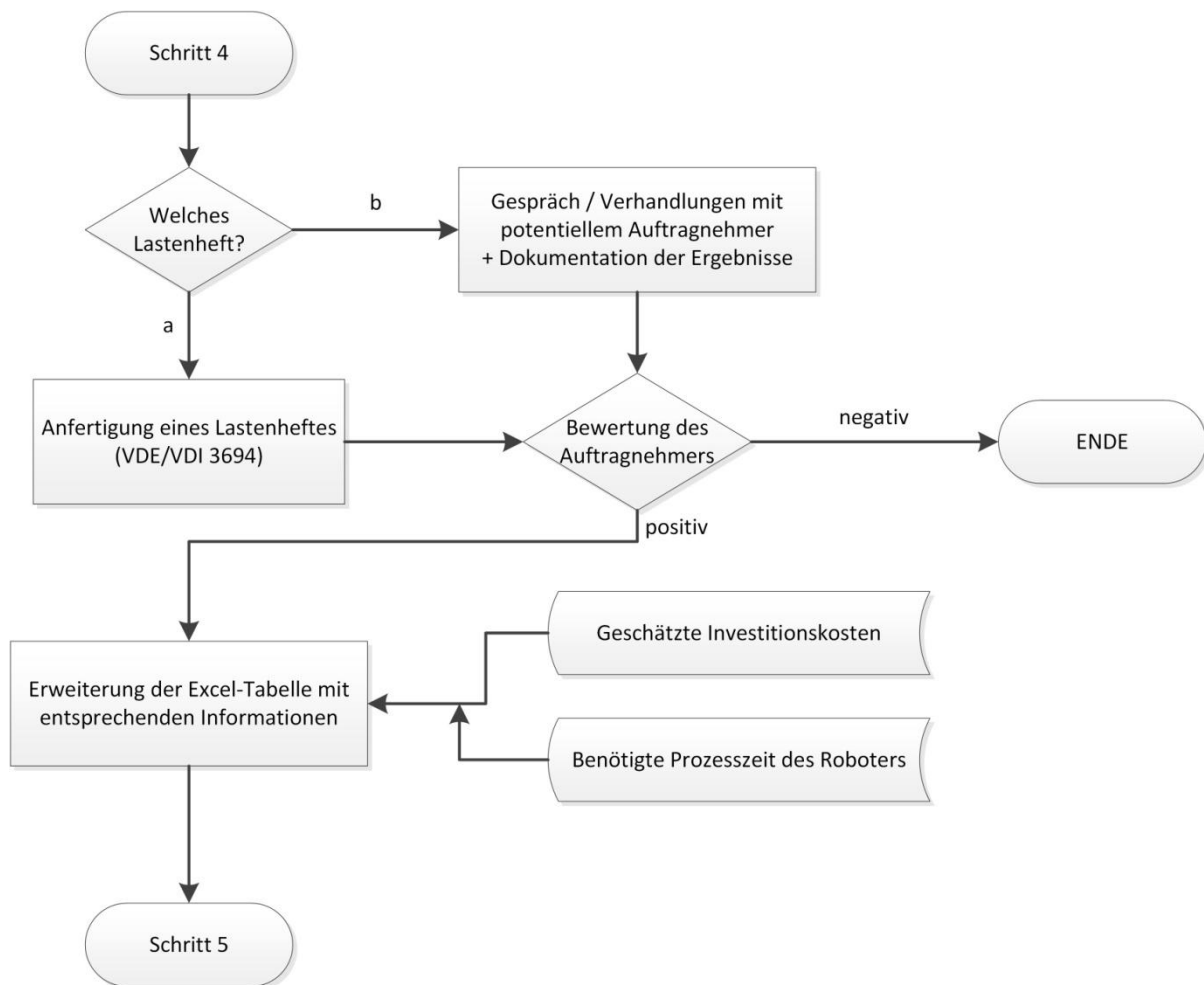


Abbildung 5.6 - Lastenheft

5.8.2 Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen

Die Durchführung dieses Abschnitts wird entweder vom Produktionsleiter und dem für die Automatisierungsaufgabe zusammengestellten Team erledigt. Die Entscheidungen werden in einem Expertengespräch gefällt. Das Lastenheft ist von einem Mitarbeiter anzufertigen, der bereits Erfahrung auf diesem Gebiet hat.

5.9 Abschnitt 5: Herstellkostenvergleich

In dieser Phase werden die Fertigungskosten der bestehenden Konfiguration mit einer möglichen zukünftigen Lösung verglichen. Der Begriff Fertigungskosten wird im Kapitel 2.2 erläutert.

Dabei gibt es zwei verschiedene Varianten, wie sich eine automatisierte Arbeitsstation auf die Fertigungskosten auswirken kann:

- **Variante 1 - Der Roboter ersetzt den Mitarbeiter komplett:**

D.h. alles was ein Mitarbeiter bisher erledigt hat wird nun von einem Roboter ausgeführt, was bedeutet, dass der Arbeiter komplett durch einen Roboter ersetzt wird. Die primäre Ersparnis ergibt sich aus einer Reduktion der Mitarbeiteranzahl und einer eventuellen Qualitätsverbesserung. Kann durch die Automatisierung nicht nur ein Mitarbeiter eingespart werden, sondern auch die Taktzeit erniedrigt werden, kann bei gleichbleibender Arbeitszeit die produzierte Stückzahl erhöht werden.

- **Variante 2 - Der Roboter wird als Ergänzung eingesetzt:**

Der Roboter kann nur einen Teil des Arbeitspensums der Station erfüllen: D.h. der Roboter erledigt einen Teilaspekt und der Rest wird weiterhin manuell ausgeführt. Dieser Restanteil wird dann auf die gleiche Anzahl von Mitarbeitern aufgeteilt. Eine Verbesserung wird hier dadurch erzielt, dass das verbleibende Arbeitspensum pro Mitarbeiter kleiner wird und somit theoretisch mehr Produkte pro Zeiteinheit produziert werden können, d.h. eine höhere Produktivität erreicht wird.

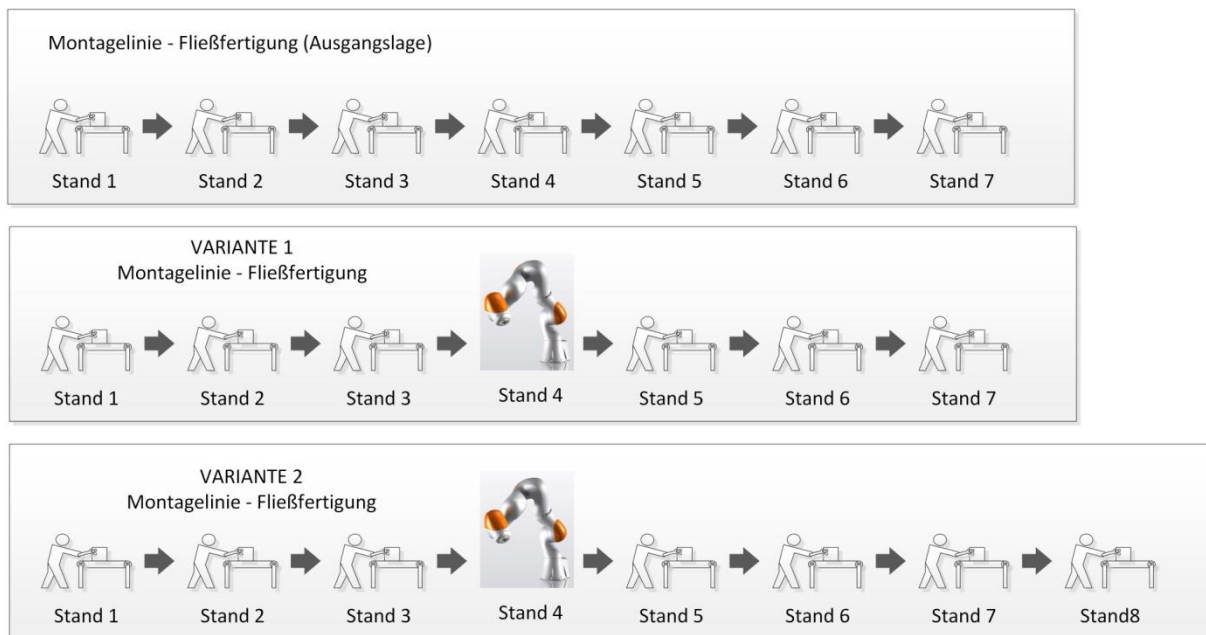


Abbildung 5.7 - Umsetzungsvarianten

Bei der Berechnung der Fertigungskosten für die automatisierte Lösung sind die Investitionskosten abzuschreiben. Eine Abschreibung ist eine Wertminderung, die durch betriebliche Nutzung des Investitionsgegenstandes in einem bestimmten Zeitraum entsteht. Dabei gibt es mehrere Möglichkeiten diese zu berechnen. In dieser Arbeit wird die lineare Abschreibung verwendet. Dem Anwender der Methodik steht es frei eine beliebige Variante zu wählen.

Die lineare Abschreibung wird durch folgende Formel beschrieben: [31]

$$a = \frac{A - R}{n}$$

Formel 11: lineare Abschreibung

mit:

a	jährliche Abschreibung
A	Anfangswert der Maschine
R	Restwert der Maschine (am Ende der Nutzungsdauer)

n geplante Nutzungsdauer der Maschine

5.9.1 Handlungsablauf

Es ist wie in *Abbildung 5.8 - Herstellkostenvergleich* dargestellt vorzugehen.

Zunächst ist festzulegen, welche und wie viele Stationen in Abschnitt 6 aufsteigen und somit die Investitionsrechnung durchlaufen.

Die Konzepte der Fremdfirmen, die aus Abschnitt 4 hervorgegangen sind, werden anschließend geprüft. Um die Fertigungskosten vergleichen zu können sind aus diesen Konzepten folgende Informationen zu sammeln:

- Investitionskosten
- Nutzungsdauer der Anlage
- Sondereinzelkosten der Fertigung
- Werkzeugkosten
- Anteil des Arbeitspensums der Station, die der Roboter erledigt
- Zeit, die der Roboter für die Arbeitserledigung benötigt

Weiters geht aus dem Konzept hervor, welche der beiden oben genannten Varianten in Frage kommt. Sollten beide Varianten möglich sein, so können beide nachgeprüft werden.

Da sich für eine Station mehrere Lösungen ergeben können, wird je Lösung eine Variante gebildet. Dabei erhält die erste Variante den Zusatz "-1" und die zweite Variante den Zusatz "-2"

Anschließend werden die derzeitigen Fertigungskosten mit den potentiellen Fertigungskosten der zu untersuchenden Lösungen verglichen. Um eine Reihung zu erreichen werden die potentiellen auf die derzeitigen Fertigungskosten bezogen.

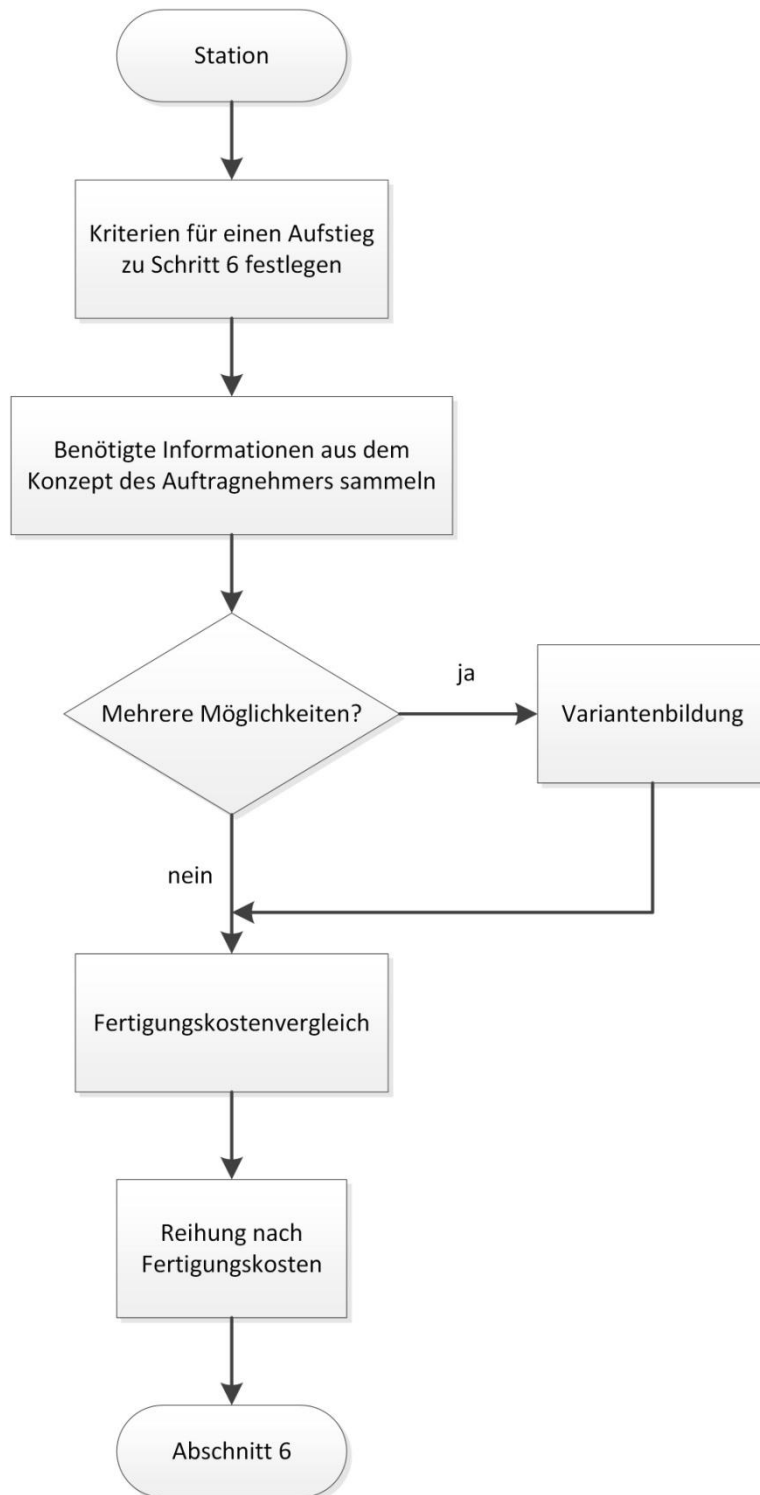


Abbildung 5.8 - Herstellkostenvergleich

5.9.2 Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen

Wie in den bereits erfolgten Abschnitten ist wieder ein Linienverantwortlicher, der Produktionsverantwortliche oder einem Team, welches mit dem Automatisierungsprojekt betraut ist, für die Durchführung verantwortlich.

5.9.3 Beispiel

Im Folgenden soll beispielhaft gezeigt werden, wie Abschnitt 5 ausgeführt wird. In diesem Beispiel haben es vier Stationen in diese Phase geschafft und die Fremdfirma hat diverse Lösungsmöglichkeiten erarbeitet. Aus der Tabelle ist zu ersichtlich, dass vor allem die Varianten "Stand 3 - 1" und "Variante 8 - 2" vielversprechende Lösungen darstellen.

Definition / Name	Fertigungskosten je produziertem Teil	$[\text{FK}_{\text{bestehend}} / \text{FK}_{\text{nach Investition}}] \times 100 \%$
Stand 2	€ 47	100%
Stand 2 - 1	€ 44	93,60%
Stand 2 - 2	€ 51	108,50%
Stand 3	€ 44	100,00%
Stand 3 - 1	€ 32	72,70%
Stand 7	€ 47	100,00%
Stand 7 - 1	€ 46	97,90%
Stand 8*	€ 46	100,00%
Stand 8* - 2	€ 35	76,10%
Stand 13	€ 47	100,00%
Stand 13 - 2	€ 48	102,10%

Tabelle 11 - Beispiel Herstellkostenvergleich

5.10 Abschnitt 6: Investitionsrechnung

Alle verbliebenen Stationen werden im Zuge des letzten Abschnitts einer Investitionsrechnung unterzogen. Nach dem sechsten Abschnitt ist die Methodik abgeschlossen und liefert eine solide Entscheidungsgrundlage für die Verantwortlichen, die im Anschluss über eine Umsetzung entscheiden.

5.10.1 Handlungsablauf

Grundsätzlich gibt es mehrere Arten der Investitionsrechnung, wie im Theorieteil bereits erläutert. Dem Anwender der Methodik ist selbst überlassen welche gewählt

wird. Aus den im Kapitel 2.4 angeführten Gründen ist es aber empfehlenswert die Investitionsrechnung dynamisch durchzuführen. Auf die genaue Beschreibung der Durchführung einer Investitionsrechnung wird verzichtet mit dem Verweis auf Kapitel 2.4, [9] und [31].

5.10.2 Verantwortliche und Entscheidungskompetenzen

Personen, die bereits Erfahrung im Bereich Investitionsrechnung haben, sind zumindest an deren Ausführung zu beteiligen, um den Aufwand möglichst gering zu halten. Idealerweise sind dies Personen, die bereits im Projekt mitgewirkt haben bzw. mit der Thematik vertraut sind.

6 Überprüfung der Entscheidungsmethodik

In diesem Kapitel wird die entwickelte Entscheidungsmethodik mit realen Daten getestet. Dies geschieht am Beispiel eines Herstellers von Motorrädern. Aufgrund von Geheimhaltungsklauseln werden die Daten und somit auch die Beispiele anonymisiert behandelt. Die Daten basieren jedoch auf einer realen Fließbandmontage.

6.1 Produktion von Motorradmotoren am Fließband

Die Montage von Motoren eines Herstellers von Motorrädern soll hinsichtlich der Automatisierbarkeit von angewandten Schraubprozessen geprüft werden. Das zu überprüfende Fließband ist vom Hersteller bereits vorgegeben und umfasst 24 Arbeitsplätze an denen die Motoren zusammengebaut werden.

6.1.1 Abschnitt 1

Zur Bearbeitung von Abschnitt 1 wird das in *Abbildung 5.3* dargestellte Flussdiagramm durchlaufen.

1. Definition der Arbeitsstation

Laut Vorgaben des Herstellers soll *Montagelinie 2* überprüft werden. An dieser werden die Motoren an 24 Stationen verschraubt. Die Namen der Stationen werden folgendermaßen definiert:

- Stand 01
- Stand 02
- Stand 03
-
- Stand 24

2. Gibt es eine aktuelle MTM-Analyse der Montagelinie?

Zur aktuellen Struktur und zum Arbeitsablauf gibt es keine aktuelle MTM-Analyse. Es wurde eine Analyse durchgeführt, als noch an 17 Ständen

produziert wurde. Eine MTM-Analyse der aktuellen Struktur wird vorerst nicht gewünscht.

3. *Gibt es einfache Maßnahmen zur sofortigen Verbesserung?*

Unter trivialen Möglichkeiten versteht man in diesem Zusammenhang Maßnahmen, die keine größeren Investitionen erfordern. Durch konsequente Anwendung kontinuierlicher Verbesserungsprozesse, Qualitätsmanagement Tools und Verfahren der Produktionsoptimierung ist seitens des Herstellers sichergestellt, dass es keine weiteren trivialen Maßnahmen gibt.

4. *Sind an der Fertigungslinie Produktionsänderungen bereits geplant bzw. in naher Zukunft absehbar?*

Laut Herstellerangaben sind in nächster Zukunft keine wesentlichen Umstellungen in der Produktion zu erwarten. Es kommt zwar in regelmäßigen Abständen zu Modellwechseln, die neuen Modelle unterscheiden sich aber von der Grundstruktur her relativ wenig.

5. *Gibt es einen Arbeitskräftemangel an der jeweiligen Montagelinie bzw. gibt es Arbeitsstationen für die es besonders schwierig ist Arbeitskräfte zu finden?*

In nächster Zeit ist in der betrachteten Region mit keinem Mangel an Arbeitskräften zu rechnen. Allerdings gibt es immer wieder Schwierigkeiten an Stand 04 und Stand 22. Durch die besonders hohe Monotonie an diesen Arbeitsplätzen ist es schwierig motivierte Mitarbeiter zur Erledigung dieser Stationen zu finden. Trotz Jobrotation werden diese von den Mitarbeitern sehr ungerne ausgeführt.

Dies ist der Grund, warum diese beiden Stände in *Tabelle 12* mit einem "*" gekennzeichnet sind.

6. *Sind neue Gesetze und Arbeitsrichtlinien absehbar für die Arbeitsausführung an der jeweiligen Montagelinie/Arbeitsstation?*

Durch intensive Beobachtung dieses heiklen Themas durch den Hersteller sind neue Gesetze und Arbeitsrichtlinien in nächster Zeit nicht absehbar.

7. *Sind bestehende Lösungen zukunftsträchtig bzw. sind die Verantwortlichen mit der Lösung zufrieden?*

Stand 12 und Stand 15 wurden vor kurzem mit einer semi-automatischen 4-Spindel-Verschraubung ausgestattet. Die Komplexität und der Schwierigkeitsgrad der Aufgaben machte genau diese Lösung notwendig. Es wurde deshalb entschieden, diese Arbeitsplätze nicht weiter zu untersuchen.

6.1.2 Abschnitt 2

Zunächst müssen die Aufstiegskriterien festgelegt werden. Nach Vorgaben des Herstellers sollen die vier Stationen an denen die meisten Schraubprozesse ausgeführt werden, in Abschnitt 3 gelangen. Zusätzlich ist die Mindestanzahl von Schraubprozessen an einer Arbeitsstation mit zehn vorgegeben. Anschließend werden die benötigten Informationen gesammelt.

Die Ergebnisse sind auszugsweise in *Tabelle 12* dargestellt.

Definition	Anzahl der Schraubprozesse	b
Stand 01	4	NEIN
Stand 02	0	NEIN
Stand 03	0	NEIN
Stand 04 *	24	–
Stand 05	3	NEIN
Stand 06	6	NEIN
Stand 07	5	NEIN
Stand 08	4	NEIN
Stand 09	2	NEIN
Stand 10	3	NEIN

Tabelle 12 - Abschnitt 2: Dokumentation (Auszug)

Danach werden die Stationen nach der Anzahl der Schraubprozesse gereiht.

Definition	Anzahl der Schraubprozesse
Stand 04 *	24
Stand 22	20
Stand 19 *	12

Tabelle 13 - Reihung Abschnitt 2

Beim Analysieren der Arbeitsstationen bezüglich anderer automatisierbarer Prozesse ist eine Station besonders aufgefallen. An Stand 01 werden diverse Lager zuerst manuell positioniert und anschließend hydraulisch mit einer Maschine eingepresst. Vor allem das Positionieren der Lager ist automatisiert sehr gut zu bewältigen. Der Hersteller hat sich dazu entschlossen dies zu dokumentieren und im Zuge eines anderen Projektes gemeinsam mit einer anderen Produktionsabteilung genauer zu analysieren.

Abschnitt 2 wird mit der Aussortierung der Stationen, die die Aufstiegsriterien nicht erfüllen und der Reihung der restlichen abgeschlossen. Wie zu Beginn festgelegt, steigen die vier bestgereihten Stationen in Abschnitt 3 auf. Da aber nur drei Stationen alle Kriterien erfüllen, steigen auch nur diese auf, wie in *Tabelle 13* dargestellt.

6.1.3 Abschnitt 3

Zur Durchführung von Abschnitt 3 wird das in *Abbildung 5.5* dargestellte Flussdiagramm durchlaufen.

Zunächst wird festgelegt, dass die zwei bestgereihten Stationen aus Abschnitt 3 auch in Abschnitt 4 betrachtet werden. Zusätzlich will der Hersteller, dass das Automatisierungspotential mindestens 1,75 beträgt. D.h. falls dieser Wert von keiner der Stationen erreicht wird, so wird die Methodik nach diesem Schritt beendet.

Da die Toleranzen beim Fügevorgang nicht bekannt sind bzw. der Hersteller vermutet, dass diese nicht unbeträchtlich sind, wurden diese gemessen. Mit einem Kamerasystem¹ und einem Analyseprogramm der Firma Keyence sind an der Montagelinie die Ungenauigkeiten bestimmt worden. Das Ergebnis ist in *Abbildung 6.1* und *Abbildung 6.2* durch die blauen Balken dargestellt. Teilweise sind die Abweichungen größer als drei Millimeter. Eine Nummerierung der Montagewagerl machte es möglich, Wagerl mit großer Abweichung zurückzuverfolgen. Diese wurden untersucht und es wurde festgestellt, dass die Lager zum Schwenken des Motors bereits ausgeschlagen sind. Diese wurden durch neue Lager ersetzt und anschließend wurde die Montagelinie erneut bezüglich der Toleranzen untersucht. Die Ergebnisse sind durch die roten Balken dargestellt. Die Tausch der Lager führte dazu, dass die großen "Ausreißer" verschwanden und die maximale Abweichung, sowohl in x- als auch in y-Richtung, vom Mittelwert absolut nicht größer als drei Millimeter ist. Das vollständige Versuchsprotokoll befindet sich in im Anhang in Kapitel 14.1.

¹ <http://www.keyence.de/products/vision/vision-sys/cv-x100/index.jsp>

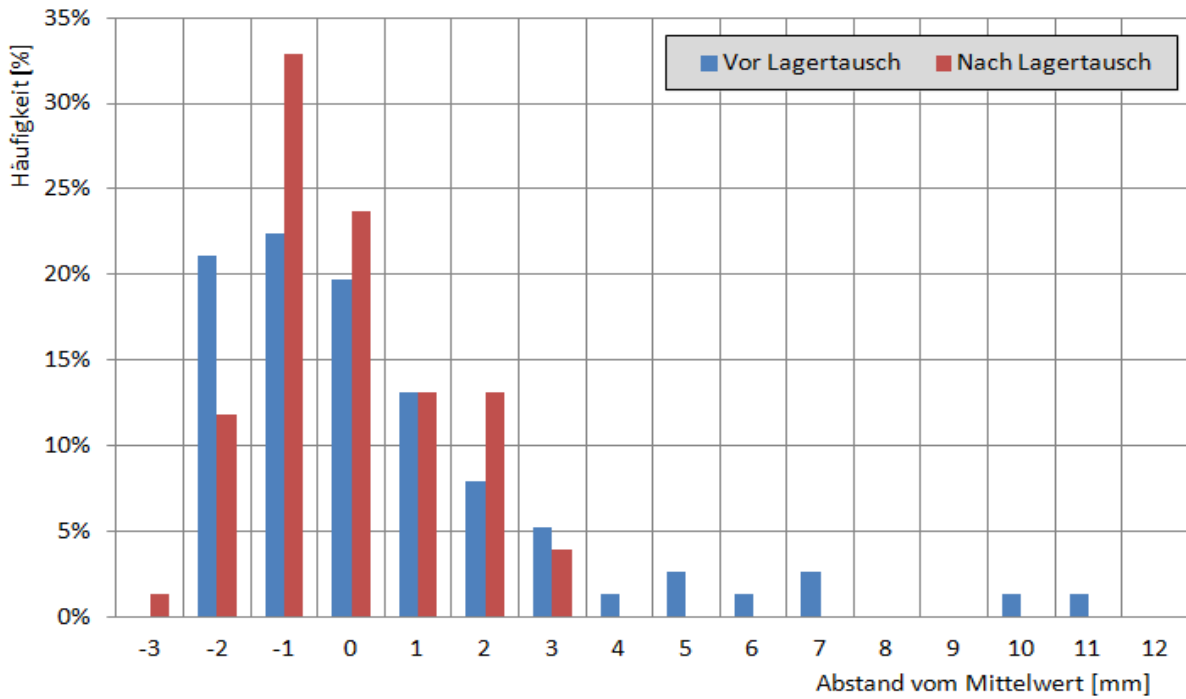


Abbildung 6.1 - Positionsabweichung vom Mittelwert in x-Richtung

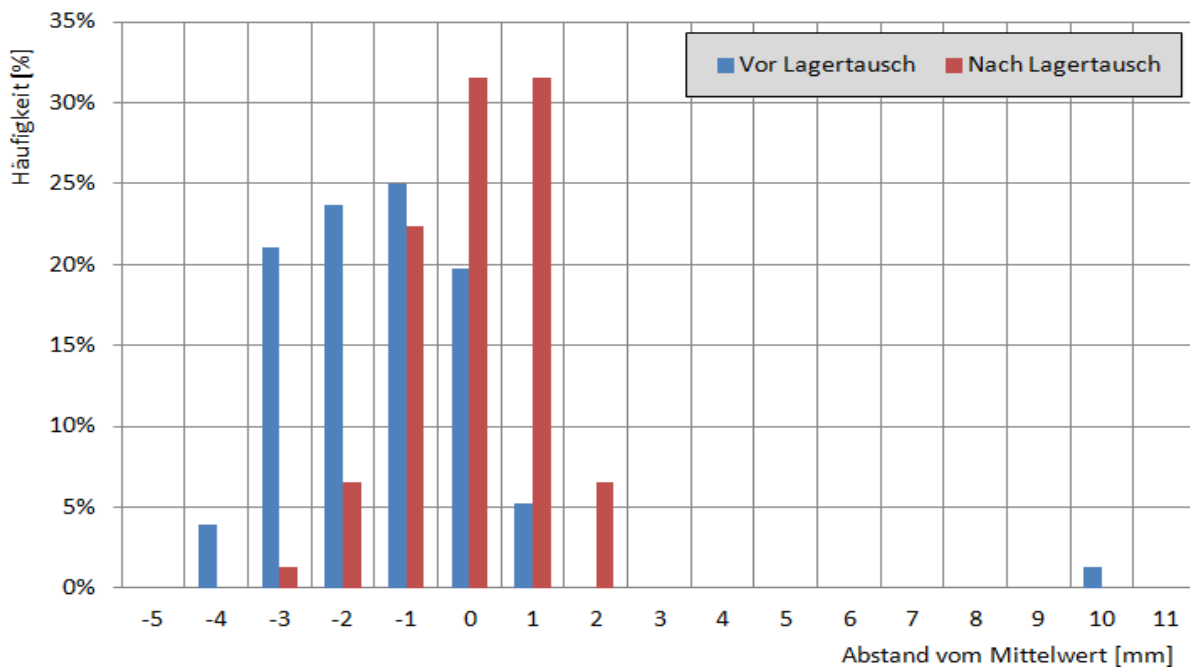


Abbildung 6.2 - Positionsabweichung vom Mittelwert in y-Richtung

Da für die verbleibenden drei Stationen keine MTM-Analyse vorhanden ist, wurde diese durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in *Tabelle 14* dargestellt. Eine ausführliche Dokumentation der MTM-Analyse findet sich im Anhang in Kapitel 14.2.

	MTM - Zeit [sek]	MTM-Zeit "Schrauben" [sek]	Zeitanteil Schrauben
Stand 04 *	107,9	94,9	88,0%
Stand 19	133,6	66,7	49,9%
Stand 22 *	114,4	89,4	78,1%

Tabelle 14 - Ergebnisse der MTM-Analyse

Die Tätigkeit "Sichtkontrolle und Freigabe" wurde jeweils zur *MTM-Zeit "Schrauben"* hinzugefügt, da diese auch durch ein Kamerasystem am Roboter übernommen werden kann. Besonders in Sachen Qualitätskontrollen macht dies Sinn.

Bestimmung der Zuteilungsfaktoren, wie in *Tabelle 15* dargestellt, erfolgt mit Hilfe der Produktstruktur und Standardarbeitspläne. Diese sind exemplarisch im Anhang in Kapitel 14.2 dargestellt.

Im Ist-Zustand werden an Stand 04 Schrauben mit zwei verschiedenen Kopfformen verschraubt, siehe "Stand 04 */1". Ein Gespräch mit Verantwortlichen der Entwicklungsabteilung ergab, dass im Zuge der Umstellung auf die nächste Produktgeneration die Kopfformen vereinheitlicht werden, d.h. es wird nur mehr ein Werkzeug benötigt. Deshalb wird auch die Variante "Stand 04 */2" berücksichtigt.

	Stand 04 * /1	Stand 04 * /2	Stand 19	Stand 22 *
Z1	1	1	1	1
Z2	2	1	2	1
Z3	2	2	2	2
Z4	1	1	3	2
Z5	2	2	2	2
Z6	1	1	3	#
Z7	1	1	1	1
Automatisierungs- potential	1,47	1,19	2,12	1,47

Tabelle 15 - Zuteilungsfaktoren Auswertung

Für Stand 22 wird das Automatisierungspotential ohne automatisierte Schraubenzuführung mit der *Formel 10* berechnet. Eine automatisierte Zuführung ist nicht notwendig, da die Schrauben bereits an Station 21 gesteckt werden. Das Automatisierungspotential für Stand 04 und Stand 19 wird mit automatisierter Zuführung bzw. *Formel 9* berechnet. In *Tabelle 16* sind die Ergebnisse gereiht dargestellt.

	P_{mitsZ}	P_{ohneZ}
Stand 04 * /2	1,19	-
Stand 04 * /1	1,47	-
Stand 22 *	-	1,47
Stand 19	2,12	-

Tabelle 16 - Auswertung Automatisierungspotential

Stand 04 und Stand 22 erfüllen die Aufstiegskriterien und gelangen somit in den Abschnitt 4. Für Stand 19 ist hiermit die Methodik beendet.

6.1.4 Abschnitt 4

Aus Zeitgründen und um den Aufwand anfangs gering zu halten wird die Variante "Mini"-Lastenheft, wie in Kapitel 5.8 beschrieben, ausgewählt.

Da die Ausführung dieser Variante sehr individuell gestaltet werden kann, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher darauf eingegangen.

Vom Roboterhersteller wurde eine Machbarkeitsstudie und anschließend ein Angebot erstellt.

Angebot eines Roboterherstellers (Eckdaten):

- Sowohl Stand 04, als auch Stand 22 eignen sich für einen Einsatz eines Schraubroboters.
- Die vorgegebene Taktzeit wird eingehalten
- Die Investitionskosten beinhalten:
 - Hardware,
 - Software und
 - Integration des Roboters
- An Stand 04 werden die M8-Schrauben automatisiert zugeführt.

Weitere Informationen werden in Kapitel 6.1.5 dargelegt.

6.1.5 Abschnitt 5

Nach Vorgaben des Herstellers sollen jene Stände in Abschnitt 6 gelangen, an denen sich durch den Schraubroboter eine Senkung der Herstellungskosten gegenüber manueller Montage ergibt.

Anschließend werden die benötigten Informationen gesammelt.

- Investitionskosten: Die Kosten für die Hardware, Software und Integration des Roboters werden laut einem Roboterhersteller wie folgt kalkuliert:
 - Roboter Stand 04: 85.000€ (mit automatisierter Schraubenzuführung)
 - Roboter Stand 22: 79.000€ (ohne automatisierte Schraubenzuführung)
 - Werden beide Stationen automatisiert verringert sich der Preis für die Roboter um jeweils 10.000€.

- Nutzungsdauer der Anlage: Aus strategischen Gründen ist die Produktion in der heutigen Form bis auf kleine Änderungen für die nächsten fünf Jahre gesichert. Dieser Zeitraum wird als minimale Nutzungsdauer herangezogen.
- Sondereinzelkosten der Fertigung:
 - Da der Roboter auch die Aufgabe "Sichtkontrolle und Montagewagen freigeben" ausführen können muss, wird zusätzlich ein Kamerasystem benötigt. Einem Angebot eines Industriekameraherstellers folgend werden dafür 4.000€ kalkuliert. Nach Vorgaben des Hersteller muss mindestens ein Mitarbeiter mit der Robotersoftware vertraut sein. Ein entsprechender Kurs wird vom Roboterhersteller angeboten und kostet ca. 5000€.
- Werkzeugkosten: Es werden keine neuen Werkzeuge benötigt bei der Umstellung.
- Anteil des Arbeitspensums der Station, die der Roboter erledigt: Die genaue Aufteilung findet sich im Anhang in Kapitel 14.3.
 - Stand 04: Durch die Installation einer automatisierten Schraubenzuführung kann der Arbeitsschritt "5 M8 Schrauben stecken" vom Roboter ausgeführt werden. Die restlichen Schrauben werden ohnehin bereits am vorgelagerten Stand 03 gesteckt. Die Arbeitsschritte "Laufzettel Motornummer Vgl." und "Motor" drehen, können ohne Beeinflussung der Taktzeit nach Stand 05 bzw. Stand 06 verschoben werden.
 - Stand 22: Es ist keine automatisierte Schraubenzuführung nötig, da alle Schrauben bereits an Stand 21 gesteckt werden. Die Arbeitsschritte "Kettenspanner entriegeln" und "Verschlusschraube montieren" können ohne Beeinflussung der Taktzeit nach Stand 20 bzw. Stand 21 verschoben werden. Durch eine einfache Spezialkonstruktion ist es möglich, dass der Roboter den Arbeitsschritt "Getriebe durchschalten" ausführen kann.

Laut Vorgaben des Herstellers wird Variante 1 berechnet, bei der der Roboter einen Mitarbeiter komplett ersetzt, wie in *Abbildung 5.7* dargestellt. Der Grund dafür liegt in den bereits ausgeschöpften Platzverhältnissen, die es nicht erlauben eine zusätzliche Station in die Fließfertigungslinie zu integrieren. Daher macht eine Berechnung nach Variante 2 keinen Sinn.

Nachdem aus dem Angebot des Roboterherstellers die nötigen Informationen entnommen wurden, werden die Fertigungskosten verglichen. In *Abbildung 6.3* ist die Berechnung der Fertigungskosten an Stand 04 vor der Investition dargestellt. *Abbildung 6.4* zeigt die Berechnung der Fertigungskosten an Stand 04 bei automatisierter Montage, falls nur Stand 04 automatisiert wird. Die orange markierten Zeilen in der *Abbildung 6.4* deuten an, dass der Roboter diese Aufgaben nicht erledigen kann bzw. dies ein Mitarbeiter an einer anderen Station erledigen muss. Da diese Tätigkeiten nicht wegfallen, werden sie in den Fertigungskosten mitkalkuliert. Die Berechnung der Maschinenstundensätze sowie die komplette Berechnung aller Fertigungskosten befindet sich im Anhang in Kapitel 14.3.

Stand 04 (manuell)			
Mitarbeiter / h	€ 30,00		
		Mitarbeiter	
1 5 M8 Schrauben stecken	185 tmu	6,7 sek	
2 Gehäuse Verschrauben	1855 tmu	66,8 sek	
3 Laufzettel Motornummer Vgl.	150 tmu	5,4 sek	
4 Motor drehen	213 tmu	7,7 sek	
5 Sichtkontrolle, Montagewagen freigeben	596 tmu	21,5 sek	
Summe		108,0 sek	
sachliche Verteilzeit (20%)		21,6 sek	
Gesamtzeit		129,6 sek	
		= 0,0360 h	
Fertigungskosten an der Station pro Motor		€ 1,080	

Abbildung 6.3 - Fertigungskosten bei manuelle Verschraubung (Stand 04)

Stand 04 (automatisiert): Automatisierung Stand 04			
Mitarbeiter / h		€ 30,00	
Maschinenstunde		€ 7,15	
		Maschine	Mitarbeiter
1	5 M8 Schrauben stecken und verschrauben; Gehäuseschrauben anziehen	115,0 sek	0,0 sek
2	Laufzettel Motornummer Vgl.	0,0 sek	5,4 sek
3	Motor drehen	0,0 sek	7,7 sek
4	Sichtkontrolle, Montagewagen freigeben	2,0 sek	0,0 sek
	Summe	117,0 sek	13,1 sek
	sachliche Verteilzeit (20%)	0,0 sek	2,6 sek
	Gesamtzeit	117,0 sek	15,7 sek
		0,0325 h	0,0044 h
		0,2325 €	0,1307 €
Investitionskosten		94000,00 €	
Abschreibungsdauer in Monate		60	
kalkulatorische Abschreibung pro Monat		1566,67 €	
Stückzahl pro Monat		4800	
kalkulatorische Abschreibung pro Stück		0,3264 €	
Fertigungskosten an der Station pro Motor			€ 0,6896

Abbildung 6.4 - Fertigungskosten pro Stück bei automatisierter Verschraubung (Stand 04)

			Fertigungskosten pro Motor
manuelle Montage		Stand 04	€ 1,0796
		Stand 22	€ 1,1441
automatisierte Montage	und	Stand 04	€ 0,6354
		Stand 22	€ 0,6127
	oder	Stand 04	€ 0,6896
		Stand 22	€ 0,6672

Abbildung 6.5 - Fertigungskostenvergleich

Die Investitionskosten reduzieren sich pro Roboter um 10.000€, wenn beide Stände automatisiert werden bzw. zwei Roboter gekauft werden. Dies hängt laut Angebot des Roboterherstellers mit einem größeren Spielraum für Rabatte bei größeren Auftragssummen zusammen. Eine geringere Investitionssumme wirkt sich positiv auf die Fertigungskosten aus, wie in *Abbildung 6.5* dargestellt.

Der Vergleich der Fertigungskosten, welcher in *Abbildung 6.5* dargestellt ist, führt zur Endreihung von Abschnitt 5, wie in *Abbildung 6.6* dargestellt. Der Quotient aus den Fertigungskosten nach zu den Fertigungskosten vor Investition bestimmt die Reihung.

Automatisierung	<u>Fertigungskosten nach Investition</u> <u>Fertigungskosten vor Investition</u>
Stand 04 & Stand 22	56,20%
Stand 22	58,32%
Stand 04	63,87%

Abbildung 6.6 - Endreihung Abschnitt 5

Gemäß den gegebenen Aufstiegsriterien gelangen Stand 04 und Stand 22 in Abschnitt 6 und werden einer Investitionsrechnung unterzogen.

6.1.6 Abschnitt 6

Im Zuge von Abschnitt 6 wird die Automatisierung von Stand 04 und Stand 22 einer Investitionsrechnung unterzogen, wie in *Abbildung 6.7* dargestellt. Laut Herstellervorgaben und Angebot des Roboterherstellers werden beide Stände gleichzeitig automatisiert.

Der Vollständigkeit halber werden auch die Varianten, dass nur eine der beiden Stationen automatisiert wird, durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass sich der Anschaffungspreis des Roboters durch die kleinere Auftragssumme jeweils um 10.000€ erhöht. Die vollständigen Investitionsrechnungen aller Varianten finden sich im Anhang in Kapitel 14.3.

Der ROI (Return on Investment) wird mit folgender Formel berechnet:

$$ROI = \frac{\sum \text{Kosten}_{\text{vor Investition}} - \sum \text{Kosten}_{\text{nach Investition}}}{\text{Investitionskosten}}$$

Formel 12 - ROI (Return on Investment) [9]

INVESTITIONSRECHNUNG: Automatisierung Stand 04 + Stand 22					
Kostenveränderung / Jahr	Erhöhung	Senkung			
Materialkosten					
Fertigungskosten		56.197 €			
Instandhaltung	2.500,00 €				
Platzkosten	605,00 €				
Energiekosten	1.000,00 €				
Kostenveränderung		€ 52.092,15			
Investitionskosten	162.000,00 €				
Nutzungsdauer	5 Jahre				
Restwert (20%)	32.400,00 €				
Zinssatz	6,00%				
	Jahr	Cash Flow	Abzinsfaktor	Barwert Cash Flow	Barwert - Summen
	0	-€ 162.000,00	1,0000	-€ 162.000,00	-€ 162.000,00
	1	€ 52.092,15	0,9434	€ 49.143,54	-€ 112.856,46
	2	€ 52.092,15	0,8900	€ 46.361,83	-€ 66.494,63
	3	€ 52.092,15	0,8396	€ 43.737,58	-€ 22.757,05
	4	€ 52.092,15	0,7921	€ 41.261,87	€ 18.504,82
	5	€ 84.492,15	0,7473	€ 63.137,45	€ 81.642,27
		Nettobarwert		€ 81.642,27	
		Interner Zinsfuß		14,88%	
		Amortisationszeit (dynamisch)		3,55 Jahre	
		ROI		50,40%	

Abbildung 6.7 - Investitionsrechnung Stand 04 & Stand 22

In *Abbildung 6.8* ist eine Gegenüberstellung der Varianten dargestellt. Der höchste absolute Nettobarwert ergibt sich, wenn sowohl Stand 04 als auch Stand 22 automatisiert werden. Automatisiert man nur Stand 22 hat dies den höchsten ROI (Return on Investment) zufolge.

	Stand 04	Stand 22	Stand 04 + Stand 22
Nettobarwert der Investition	€ 4.794,77	€ 63.184,51	€ 81.642,27
Interner Zinsfuß	1,58%	20,91%	14,88%
Amortisationszeit in Jahre	4,84	2,98	3,55
ROI	5,10%	71,39%	50,40%

Abbildung 6.8 - Investitionsrechnung: Vergleich der Ergebnisse

7 Begleitende Excel-Tabellen

Im Folgenden wird eine Excelberechnungsmappe vorgestellt, die den Anwender bei der Durchführung der Methodik unterstützt. Es ist möglich, je nach Einsatzgebiet und Anforderungen, die Mappe beliebig zu verändern und zu erweitern.

Die Berechnungsmappe enthält folgende Blätter:

- Blatt1: Vorüberlegungen
- Blatt 2: Vorselektion
- Blatt 3: Automatisierungspotentialanalyse
- Blatt 4: Herstellungskostenvergleich
- Blatt 5: Investitionsrechnung
- Blatt 6: Hintergrundinformationen

7.1 Blatt 1: Vorüberlegungen

In *Tabelle 17* wird die Eingabe der Daten von Abschnitt 1 abgehandelt. Die orange markierten Felder sind vom Anwender auszufüllen. Zuerst werden in der linken Spalte die Namen aller Stationen eingetragen. Die Wahl der Namen ist beliebig und gilt danach für alle Blätter. Anschließend werden die Fragen 5 bis 7 aus Kapitel 5.5 für jede Station beantwortet. Es ist nur eine Beantwortung mit einem JA oder einem NEIN zulässig. Wird eine Frage mit JA beantwortet, so färbt sich die Schrift automatisch rot. Dies bedeutet eine Abweichung vom normalen Entscheidungsweg.

Definition	Frage 5	Frage 6	Frage 7
....
Test 03	NEIN	NEIN	NEIN
Test 04	JA	NEIN	NEIN
Test 05	NEIN	NEIN	NEIN
....
Test 11	NEIN	NEIN	NEIN
Test 12	NEIN	NEIN	JA
Test 13	NEIN	NEIN	NEIN
....

Ausgabetabelle
erstellen

Tabelle 17 - Blatt 1: Vorüberlegungen Eingabetabelle

Ist *Tabelle 17* fertig ausgefüllt wird der Button "Ausgabetabelle erstellen" betätigt und es wird eine Tabelle mit den Stationen erstellt, die in Blatt 2 weiterbehandelt werden. "Test 4" wird z.B. mit einem "*" markiert, da Frage 5 mit einem JA beantwortet wurde.

Definition
...
Test 03
Test 04 *
Test 05
...
Test 11
Test 13
...

Tabelle 18 - Blatt 1: Vorüberlegungen Ausgabetabelle

7.2 Blatt 2: Vorselektion

Stationen, welche die Anforderungen aus Abschnitt nicht erfüllt haben, werden nicht mehr berücksichtigt. In der *Tabelle 19* sieht man, dass die Station "Test 12" genau aus diesem Grund nicht mehr geführt wird.

Die orange markierten Felder in *Tabelle 19* geben an, welche Felder vom Anwender auszufüllen sind. Dabei kann es zu zwei Fällen kommen:

1. Die Mindestanzahl an Schraubprozessen wird erreicht: Die Zahl im entsprechenden Feld färbt sich grün und die Frage b ist nicht mehr zu beantworten.
2. Die Mindestanzahl an Schraubprozessen wird nicht erreicht: Das entsprechende Feld in Spalte "b" färbt sich orange und ist somit auszufüllen.

Definition	Anzahl der Schraubprozesse	b
....
Test 03	3	JA
Test 04 *	30	-
Test 05	15	-
....
Test 11	2	NEIN
Test 13	22	-
....

Reihung
Abschnitt 2

Tabelle 19 - Blatt 2: Vorselektion Eingabe

Nach korrektem Ausfüllen aller Felder erfolgt durch betätigen der Schaltfläche "Reihung Abschnitt 2" eine automatische Reihung der Stationen, die die Aufstiegskriterien erfüllen, nach Anzahl der Schraubprozesse.

Definition	Anzahl der Schraubprozesse
Test 04 *	30
Test 13	22
Test 05	15
....

Tabelle 20 - Blatt 2: Vorselektion Reihung

Durch Vorgabe einer Maximalanzahl kann festgelegt werden wie viele Stationen aufsteigen. Vorrang haben die Stationen, an denen die Anzahl der Schraubprozesse höher ist.

7.3 Blatt 3: Automatisierungspotentialanalyse

In Blatt 3 wird eine Tabelle generiert, die alle Stationen enthält, die Abschnitt 2 passiert haben. Die orange markierten Felder in *Tabelle 21* sind vom Anwender auszufüllen. Ist die Tabelle fertig ausgefüllt, wird der Button "Automatisierungspotential berechnen + Reihung" gedrückt, wodurch *Tabelle 22* vom Programm erstellt wird. Die rote Markierung signalisiert, dass das Automatisierungspotential zu niedrig ist und die Station nicht in Abschnitt 4 gelangt.

Definition	a	b	c	d	e	f	g
Test 04 *	leicht	2	1	1	1	2	ja
Test 13	mittel	3	1	2	2	4	ja
Test 05	leicht	2	1	2	3	5	ja
....

**Automatisierungspotential
berechnen + Reihung**

Tabelle 21 - Blatt 3: Automatisierungspotentialanalyse Eingabe (a-f beziehen sich auf die Einflussfaktoren in Kapitel 5.7.1)

Definition	P _{mitSZ}	P _{ohneSZ}
Test 04 *	1,45	-
Test 05	-	1,79
Test 13	-	2,32

Tabelle 22 - Blatt 3: Automatisierungspotentialanalyse Reihung

Die benötigten Formeln und die Gewichtungsfaktoren sind vorgegeben und in Blatt 6 hinterlegt.

7.4 Blatt 4: Herstellungskostenvergleich

Zuerst muss geklärt werden, ob es verschiedene Varianten zu untersuchen gibt. Dazu werden die orange markierten Felder in *Tabelle 23* vom Anwender ausgefüllt und anschließend der Button "VARIANTENBILDUNG" betätigt.

Definition	verschiedene Varianten möglich?
Test 04 *	ja
Test 05	nein
....



Tabelle 23 - Blatt 4: Herstellungskostenvergleich Eingabe 1

Anschließend sind die orange markierten Felder in *Tabelle 24* vom Anwender auszufüllen. Das Verhältnis der Fertigungskosten nach der Investition zu Fertigungskosten vor der Investition wird gebildet und ausgegeben. Ist die *Tabelle 24* fertig ausgefüllt, wird der Button "Reihung" betätigt. Dies generiert *Tabelle 25*, welche die verbleibenden Stationen gereiht ausgibt.

Definition	FK vor Investition	FK nach Investition	FK n.I. / FK v.I
Test 04 - 1 *	€ 5,32	€ 4,56	85,71%
Test 04 - 2 *	€ 5,32	€ 4,21	79,14%
Test 05	€ 6,78	€ 6,32	93,22%
....

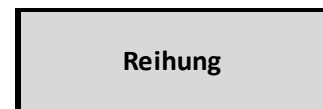


Tabelle 24 - Blatt 4: Herstellungskostenvergleich Eingabe 2

Definition	FK n.I. / FK v.I
Test 04 - 2 *	79,14%
Test 04 - 1 *	85,71%
Test 05	93,22%
....

Tabelle 25 - Blatt 4: Herstellungskostenvergleich Reihung

7.5 Blatt 5: Investitionsrechnung

Die orange markierten Felder in *Tabelle 26* sind vom Anwender auszufüllen. Dabei sind in der Spalte "Definition" nur Namen von Stationen, die Abschnitt 5 positiv absolviert haben, zugelassen. In der Spalte "Ergebnis" ist die Entscheidung der Investitionsrechnung einzugeben. Ein "positiv" steht für eine positive Investitionsentscheidung, ein "negativ" für eine negative Entscheidung.

Definition	Ergebnis
Test 04 - 2 *	positiv
Test 04 - 1 *	positiv
Test 05	negativ
....

Tabelle 26 - Blatt 5: Investitionsrechnung

7.6 Blatt 6: Hintergrundinformationen

In Blatt 6 sind die für die Berechnung und Durchführung benötigten Formeln, Informationen und Tabellen hinterlegt, wie:

- Formeln zu Berechnung des Automatisierungspotentials: *Formel 9* und *Formel 10*
- Tabelle mit den Gewichtungsfaktoren: *Tabelle 10*

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war die Entwicklung einer Methodik zur Beurteilung des Automatisierungspotentials von Schraubprozessen an einer Fließmontagelinie mit Taktzeit im niedrigen Minutenbereich. Ein strukturierter Aufbau, eine adäquate Einbindung wichtiger Einflussfaktoren und eine schlanke Kalkulation sollten genau dies möglich machen.

Die ermittelten Einflussfaktoren und besonders deren Gewichtung zueinander sind Grundlage des Modells. Allgemeine Faktoren wie die Amortisierungszeit, Nutzungsdauer und die Produktionskosten wurden dabei durch Faktoren, die speziell die automatisierte Verschraubung betreffen, ergänzt.

Aufbauend auf diesen Faktoren wurde eine Methodik entwickelt, die sich aus sechs Abschnitten zusammensetzt. Der Ablauf für jeden Abschnitt ist klar vorgegeben und enthält eindeutige Entscheidungswege. Am Ende jedes Abschnitts wird kontrolliert, ob der jeweilige Arbeitsplatz die gestellten Anforderungen erfüllt und somit einen Schritt weiter gelangt. Dieser Ablauf ähnelt einem Stage-Gate-Prozess, wodurch eine scharfe Fokussierung auf die einzelnen Abschnitte und eine gute Qualität der Durchführung der Methodik gefördert wird.

Je höher der Abschnitt, desto mehr Informationen und Daten werden benötigt, d.h. der Detaillierungsgrad der Betrachtung erhöht sich. Gleichzeitig werden in höheren Abschnitten nur mehr jene Arbeitsstationen betrachtet, die die Anforderungen erfüllen. In Abschnitt 2 werden nur Informationen zur Anzahl der Schraubprozesse je Arbeitsstation benötigt. Wohingegen in Abschnitt 3, in welchem das Automatisierungspotential ermittelt wird, deutlich mehr Daten zu sammeln sind. Die Erstellung eines Lastenhefts und Auswahl eines Roboterherstellers sind die Aufgaben in Abschnitt 4. In Abschnitt 5 ist das Konzept bereits bekannt und muss auf die Herstellungskosten untersucht werden. Zuletzt wird im Rahmen einer Investitionsrechnung in Abschnitt 6 der wichtigste Schritt vor einer Entscheidung durchgeführt. Falls eine Arbeitsstation bereits in Abschnitt 2 ausscheidet, ist diese in der Folge in der Methodik nicht mehr zu behandeln. Eine Beurteilung der wirtschaftlichen und technischen Sinnhaftigkeit einer automatisierten Verschraubung

an einer Fließfertigungslinie ist somit mit einem vergleichsweise geringem Aufwand praktikierbar. Dem Anwender der Methodik werden begleitende Excel-Tabellen zur Unterstützung zur Seite gestellt.

Anhand eines realen Beispiels wurde die Praktikabilität der Methodik untersucht. Dazu wurden die Stationen einer Fließmontagelinie eines Motorradherstellers bezüglich automatisierbarer Schraubprozesse untersucht. Es war gefordert, dass der Anwender der Methodik das Automatisierungspotential und die Sinnhaftigkeit einer automatisierten Verschraubung mit möglichst geringem Aufwand und mit niedrigem zeitlichen Aufwand bestimmen kann.

Die Ergebnisse der Überprüfung der Entscheidungsmethodik unterstreichen die Erreichung der gesetzten Ziele aus Sicht des Autors. Vor allem für Fließfertigungen mit Taktzeit im niedrigen Minutenbereich stellt die Methodik ein geeignetes Verfahren dar.

8.2 Ausblick

Je nach Unternehmen und Fließfertigungslinie wird die Methodik an einigen Punkten individuell an die jeweilige Situation angepasst. Folgende Punkte sind betroffen:

- Gewichtungsfaktoren in Abschnitt 3: Die im Rahmen eines Expertengesprächs ermittelten Gewichtungsfaktoren der Einflussfaktoren wurden speziell für die in dieser Arbeit durchgeführte Berechnung angepasst. Sie sind als solide Grundlage auch für andere Fließmontagelinien anwendbar. Eine Überprüfung der tatsächlichen Gewichtung könnte Thema weitere Untersuchungen sein. Es ist anzunehmen, dass die Gewichtungsfaktoren von den hergestellten Erzeugnissen sind. Auch deshalb ist eine Überprüfung und eventuell eine individuelle Anpassung an die jeweilige Fließmontagelinie sinnvoll.
- Ausführung des Lastenhefts in Abschnitt 4: Teil von Abschnitt 4 ist es zu entscheiden, welche Form des Lastenhefts gewählt wird. Auf Grund der Erfahrungen, die der Autor im Laufe der Überprüfung der Methodik in einem Produktionsunternehmen gesammelt hat, wird in dieser Arbeit zu einer Anfertigung eines sogenannten "Mini-Lastenhefts" geraten, anstatt der

Erstellung eines vollständigen Lastenhefts. Vor allem der um einiges geringere Zeitaufwand macht einen riesigen Vorteil aus. Der Roboterhersteller hat die Möglichkeit darauf aufbauend eine Machbarkeitsstudie anzufertigen und ein vorläufiges Angebot vorzulegen. Dies kann anschließend in Abschnitt 5 und Abschnitt 6 auf die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit untersucht werden. Im Falle einer positiven Beurteilung wird ein komplettes Lastenheft erstellt und der Auftrag vergeben. Dies ist jedoch nur als Vorschlag zu sehen.

Die tatsächliche Ausgestaltung dieses Schritts kann vom Anwender der Methodik individuell gewählt werden. Es müssen jedenfalls die nötigen Informationen für Abschnitt 6 gesammelt werden.

- Entscheidungsträger: Im Zuge der Erläuterung der Methodik wurde die Zusammensetzung des durchführenden Teams bzw. die verantwortlichen Personen genannt. Dies soll lediglich ein Vorschlag sein und muss jedenfalls an die Aufbaustruktur des jeweiligen Unternehmens angepasst werden.

Eine Weiterentwicklung der Methodik sollte die Integration von Beurteilungsmöglichkeiten bezüglich anderer automatisierbarer Prozesse beinhalten. Dies könnte das Anwendungsspektrum verbessern.

Sollte sich die Methodik in einem Unternehmen bewähren, so ist anzuraten die Anwendung als strategische Anwendungshilfe im Unternehmen einzusetzen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] E. Abele und G. Reinhart, Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen, Carl Hanser Verlag, 2011.
- [2] Eurostat, 2012. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat>. [Zugriff am 10 Januar 2015].
- [3] P. Scharf und H. Großberndt, Die automatisierte Montage mit Schrauben - 2.Auflage, Expert-Verlag, 1994.
- [4] E. Westkämpfer und H. J. Warnecke, Einführung in die Fertigungstechnik. 8.Auflage, Vieweg+Teubner, 2010.
- [5] K. W. Helbing, Handbuch Fabrikprojektierung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, p. 870.
- [6] B. Lotter und H.-P. Wiendahl, Montage in der industriellen Produktion - 2.Auflage, Springer-Verlag Heidelberg Berlin, 2012.
- [7] W. Plinke und M. Rese, Industrielle Kostenrechnung - 7.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [8] T. Becker, Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren - 2.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [9] U. Götze, Investitionsrechnung - 6.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [10] G. E. Fischer, Montage von Schrauben mit Industrierobotern, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990.
- [11] M. O. Blockus, Komplexität in Dienstleistungsunternehmen: Komplexitätsformen, Kosten- und Nutzenwirkungen, empirische Befunde und Managementimplikationen, Diss. Univ. Basel, 1.Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010.
- [12] DIN [Hrsg.], DIN 19233 - Prozessautomatisierung, DIN V 19233:1998-07, 1998, Juli 1998.
- [13] IFR, „International Federation of Robotics,“ [Online]. Available:

- <http://www.ifr.org/news/ifr-press-release/the-robotics-industry-is-looking-into-a-bright-future-551/>. [Zugriff am 20. Dezember 2014].
- [14] E. Westkemper, M. Decker und L. Jendoubi, Einführung in die Organisation der Produktion, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [15] D. Spath, O. Ganschar, S. Gerlach, M. Hämmerle, T. Krause und S. Schlund, „Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0,“ Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013.
- [16] VDI [Hrsg.], VDI 3780: Technikbewertung - Begriffe und Grundlagen, 2000.
- [17] DIN [Hrsg.], DIN 8593-3: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 3: Anpressen, Einpressen, Einordnen, Unterteilung und Begriffe, 2003.
- [18] VDI [Hrsg.], VDI 2230 Blatt 1: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen, 2014.
- [19] H. Wiegand, K. H. Kloos und W. Thomala, Schraubverbindungen - Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung - 5.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [20] Y. Lebedynska, Entwicklung eines Informationssystems mit Reifegradmanagement für automatisierte Schraubprozesse, Technische Universität Cottbus, 2011.
- [21] B. Zeller, C. Kufner, F. Neumann, S. Krenn und F. Stumpf, „Untersuchung des Bedarfs an einem Berufsprofil "Fügetechnische Fachkraft",“ Forschungsinstitut Betriebliche Bildung GmbH, Nürnberg, 2011.
- [22] R. Wenzel, G. Fischer, G. Metze und P. Nieß, Industriebetriebslehre: das Management des Produktionsbetriebs - 1.Auflage, Leipzig Fachbuchverlag, 2001.
- [23] VDI [Hrsg.], VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole, 1990.
- [24] Robotic Industries Association, „RIA,“ [Online]. Available: <http://www.robotics.org/>. [Zugriff am 18. Dezember 2014].
- [25] M. Husty, A. Karger, H. Sachs und W. Steinhilper, Kinematik und Robotik, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1997.

- [26] XPERTGATE. [Online]. Available: <http://www.xpertgate.de/>. [Zugriff am 30. Dezember 2014].
- [27] KUKA, „KUKA Robotics,“ [Online]. Available: <http://www.kuka-robotics.com/de/>. [Zugriff am 30. Dezember 2014].
- [28] K. Beumelburg und J. Spingler, „Automatisierungspotential-Analyse: Eine Methode zur technischen und wirtschaftlichen Klassifizierung von Automatisierungspotentialen,“ *wt Werkstattstechnik online (2002)*, pp. 62-64, 2002.
- [29] VDI [Hrsg.], VDI/VDE 2862 Blatt 1: Mindestanforderungen zum Einsatz von Schraubsystemen und -werkzeugen - Anwendungen in der Automobilindustrie, 2012.
- [30] VDI [Hrsg.], VDI/VDE 3694: Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen, 2014.
- [31] H. Holland und D. Holland, *Mathematik im Betrieb: Praxisbezogene Einführung mit Beispielen - 9. aktualisierte Ausgabe*, Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, 2008.
- [32] Xpertgate, [Online] [Gelesen am: 20.12.2014], <http://www.xpertgate.de/produkte/Parallelkinematik-Roboter.html>.

10 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1.1 - Bedeutung der Produktion in der EU [2]</i>	5
<i>Abbildung 1.2 - Arbeitskosten im verarbeitenden Gewerbe in Euro je geleisteter Stunde (2012) [2]</i>	6
<i>Abbildung 2.1 - Produktion als Wertschöpfungsprozess [4]</i>	9
<i>Abbildung 2.2 - Grundformen der Fließfertigung [5]</i>	10
<i>Abbildung 2.3 - Struktur der Selbstkosten bei differenzierender Zuschlagskalkulation [4]</i>	13
<i>Abbildung 2.4 - Vergleich der Stückkosten bei manueller und automatischer Montage [3]</i>	14
<i>Abbildung 2.5 - Effizienz und Effektivität [8, p. 12]</i>	16
<i>Abbildung 3.1 - Gliederung der Montageaufgaben nach Komplexität [3]</i>	21
<i>Abbildung 3.2 - Weltweiter Absatz von Industrierobotern [13]</i>	22
<i>Abbildung 3.3 - Einsatzbereiche manueller, hybrider und automatischer Montagesystem [6]</i>	23
<i>Abbildung 3.4 - Expertenbefragung zur Wichtigkeit von menschlicher Arbeit in der Produktion [15]</i>	24
<i>Abbildung 4.1 - Übersicht über Fertigungsverfahren [17]</i>	27
<i>Abbildung 4.2 - Einflussfaktoren auf eine Schraubverbindung [18]</i>	28
<i>Abbildung 4.3 - Häufigkeit der angewandten Fügeverfahren [21, p. 23]</i>	30
<i>Abbildung 4.4 - Komplexitätsstufen [3]</i>	31
<i>Abbildung 4.5 - Einfluss der Komplexität und Fehlerart der Schrauben auf die Störempfindlichkeit [3]</i>	31
<i>Abbildung 4.6 - Ausführungsformen von Schraubanlagen [22]</i>	32
<i>Abbildung 4.7 - Einfluss der Schraubenkopfgestaltung [3]</i>	34
<i>Abbildung 4.8 - Beispiel eines automatisierten Schraubspindels [20]</i>	35
<i>Abbildung 4.9 - High Speed Pick & Place Roboter Adept Quattro s650H/850 H , [26]</i>	36
<i>Abbildung 4.10 - Industrieroboter "iiwa", [27]</i>	37
<i>Abbildung 4.11 - Kostenverantwortung und -verursachung eines Produktes [3]</i>	39
<i>Abbildung 5.1- Aufbau der Methodik</i>	48
<i>Abbildung 5.2 - Darstellung von Abschnitt 1</i>	50

<i>Abbildung 5.3 - Vorüberlegungen; Bezeichnungen 1-7 bezugnehmend auf Kapitel 5.5</i>	54
<i>Abbildung 5.4 - Vorselektion; Bezeichnungen a und b bezugnehmend auf Kapitel 5.6</i>	58
<i>Abbildung 5.5 - Automatisierungspotentialanalyse</i>	69
<i>Abbildung 5.6 - Lastenheft</i>	72
<i>Abbildung 5.7 - Umsetzungsvarianten</i>	74
<i>Abbildung 5.8 - Herstellkostenvergleich</i>	76
<i>Abbildung 6.1 - Positionsabweichung vom Mittelwert in x-Richtung</i>	84
<i>Abbildung 6.2 - Positionsabweichung vom Mittelwert in y-Richtung</i>	84
<i>Abbildung 6.3 - Fertigungskosten bei manuelle Verschraubung (Stand 04)</i>	89
<i>Abbildung 6.4 - Fertigungskosten pro Stück bei automatisierter Verschraubung (Stand 04)</i>	90
<i>Abbildung 6.5 - Fertigungskostenvergleich</i>	90
<i>Abbildung 6.6 - Endreihung Abschnitt 5</i>	91
<i>Abbildung 6.7 - Investitionsrechnung Stand 04 & Stand 22</i>	92
<i>Abbildung 6.8 - Investitionsrechnung: Vergleich der Ergebnisse</i>	92
<i>Abbildung 14.1 - Versuchsaufbau Bild 1</i>	112
<i>Abbildung 14.2 - Versuchsaufbau Bild 2</i>	113
<i>Abbildung 14.3 - Legende Versuchsaufbau</i>	113
<i>Abbildung 14.4 - Messwerte vor und nach dem Lagertausch</i>	114
<i>Abbildung 14.5 - Statistische Auswertung Versuch (vor und nach dem Lagertausch)</i>	114
<i>Abbildung 14.6 - Standardarbeitsplan Beispiel (Stand 04)</i>	115
<i>Abbildung 14.7 - Produktstrukturplan Beispiel (Stand 04)</i>	116
<i>Abbildung 14.8 - MTM-Analyse Stand 04 (Seite 1 von 4)</i>	117
<i>Abbildung 14.9 - MTM-Analyse Stand 04 (Seite 2 von 4)</i>	118
<i>Abbildung 14.10 - MTM-Analyse Stand 04 (Seite 3 von 4)</i>	119
<i>Abbildung 14.11 - Maschinenstundensatz Schraubroboter Stand 04 (Automatisierung Stand 04 und Stand 22)</i>	120
<i>Abbildung 14.12 - Maschinenstundensatz Schraubroboter Stand 22 (Automatisierung Stand 04 und Stand 22)</i>	121
<i>Abbildung 14.13 - Maschinenstundensatz Schraubroboter Stand 04 (Automatisierung Stand 04)</i>	121

<i>Abbildung 14.14 - Maschinenstundensatz Schraubroboter Stand 22 (Automatisierung Stand 22)</i>	122
<i>Abbildung 14.15 - Fertigungskosten Stand 04 (IST-Zustand)</i>	122
<i>Abbildung 14.16 - Fertigungskosten Stand 22 (IST-Zustand)</i>	123
<i>Abbildung 14.17 - Fertigungskosten Stand 04 (Automatisierung Stand 04 und Stand 22)</i>	124
<i>Abbildung 14.18 - - Fertigungskosten Stand 22 (Automatisierung Stand 04 und Stand 22)</i>	125
<i>Abbildung 14.19 - Fertigungskosten Stand 04 (Automatisierung Stand 04)</i>	126
<i>Abbildung 14.20 - Fertigungskosten Stand 22 (Automatisierung Stand 22)</i>	127
<i>Abbildung 14.21 - Investitionsrechnung (Automatisierung Stand 04 und Stand 22)</i>	128
<i>Abbildung 14.22 Investitionsrechnung (Automatisierung Stand 04)</i>	129
<i>Abbildung 14.23 Investitionsrechnung (Automatisierung Stand 22)</i>	130

11 Formelverzeichnis

<i>Formel 1: Herstellungskostenvergleich</i>	13
<i>Formel 2: Fertigungskostenvergleich</i>	14
<i>Formel 3: Fertigungskostenvergleich 2</i>	14
<i>Formel 4: Amortisationszeit</i>	16
<i>Formel 5: Automatisierungsgrad</i>	22
<i>Formel 6: Bearbeitungszeit</i>	45
<i>Formel 7: Prozesszeit Schrauben</i>	45
<i>Formel 8: Zeitlicher Anteil der Schraubprozesse</i>	45
<i>Formel 9: Automatisierungspotential (automatisierte Schraubenzuführung möglich)</i>	65
<i>Formel 10: Automatisierungspotential (automatisierte Schraubenzuführung nicht sinnvoll)</i>	66
<i>Formel 11: lineare Abschreibung</i>	74

12 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 - Beispiel: Dokumentation Abschnitt 1</i>	<i>56</i>
<i>Tabelle 2 - Zugänglichkeit: Zuteilungsfaktor Z_1.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabelle 3 - Anzahl der verschiedenen Kopfformen: Zuteilungsfaktor Z_2.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 4 - Lagetoleranzen: Zuteilungsfaktor Z_3.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 5 - Anteil an der Bearbeitungszeit: Zuteilungsfaktor Z_4</i>	<i>62</i>
<i>Tabelle 6 - Sicherheitsanforderungen: Zuteilungsfaktor Z_5.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabelle 7 - Anzahl der verschiedenen Schraubenlängen: Zuteilungsfaktor Z_6.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabelle 8 - Längen-Durchmesser-Verhältnis: Zuteilungsfaktor Z_7.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabelle 9 - Paarweiser Vergleich Gewichtungsfaktoren; Buchstaben a-g beziehen sich auf Kapitel 5.7.1</i>	<i>64</i>
<i>Tabelle 10 - Gewichtungsfaktoren</i>	<i>65</i>
<i>Tabelle 11 - Beispiel Herstellkostenvergleich</i>	<i>77</i>
<i>Tabelle 12 - Abschnitt 2: Dokumentation (Auszug).....</i>	<i>82</i>
<i>Tabelle 13 - Reihung Abschnitt 2.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabelle 14 - Ergebnisse der MTM-Analyse</i>	<i>85</i>
<i>Tabelle 15 - Zuteilungsfaktoren Auswertung</i>	<i>86</i>
<i>Tabelle 16 - Auswertung Automatisierungspotential.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabelle 17 - Blatt 1: Vorüberlegungen Eingabetabelle</i>	<i>93</i>
<i>Tabelle 18 - Blatt 1: Vorüberlegungen Ausgabetablelle</i>	<i>94</i>
<i>Tabelle 19 - Blatt 2: Vorselektion Eingabe.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabelle 20 - Blatt 2: Vorselektion Reihung.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabelle 21 - Blatt 3: Automatisierungspotentialanalyse Eingabe (a-f beziehen sich auf die Einflussfaktoren in Kapitel 5.7.1)</i>	<i>96</i>
<i>Tabelle 22 - Blatt 3: Automatisierungspotentialanalyse Reihung.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabelle 23 - Blatt 4: Herstellungskostenvergleich Eingabe 1.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabelle 24 - Blatt 4: Herstellungskostenvergleich Eingabe 2.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabelle 25 - Blatt 4: Herstellungskostenvergleich Reihung</i>	<i>97</i>
<i>Tabelle 26 - Blatt 5: Investitionsrechnung.....</i>	<i>98</i>

13 Abkürzungsverzeichnis

A	Anfangswert
AZs	statische Amortisationszeit
bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLZ	Durchlaufzeit
ES	Einsparungen
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
F_{aut}	Fertigungskosten bei automatisierter Montage
FK	Fertigungskosten
F_{man}	Fertigungskosten bei manueller Montage
G_i	Gewichtungsfaktor mit $i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$
HK_{aut}	Herstellungskosten bei automatisierter Montage
HK_{man}	Herstellungskosten bei manueller Montage
KFZ	Kraftfahrzeug
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
KE	Investitionshöhe
LAN	Local Area Network
L/d	Längen-Durchmesser Verhältnis
MTM	Methods-Time Measurement
MW	Mittelwert
o.Ä	oder Ähnliches
p.	Page
P_{mitSZ}	Automatisierungspotential mit automatisierter Schraubenzuführung
P_{ohneSZ}	Automatisierungspotential ohne automatisierter Schraubenzuführung

R	Restwert
RIA	Roboter Institute of America
ROI	Return on Investment
S_{aut}	Stückkosten bei automatisierter Montage
sek	Sekunden
S_{man}	Stückkosten bei manueller Montage
t_{aut}	Stückzeit bei automatisierter Montage
T_{BA}	Bearbeitungszeit
T_{Bef}	Beförderungszeit
t_{man}	Stückzeit bei manueller Montage
T_{Rest}	restliche Zeit
T_{SP}	Zeit, die für die Erledigung der Schraubprozesse benötigt wird
t_{SP}	Zeitlicher Anteil der Schraubprozesse
T_{Takt}	Taktzeit
TMU	Time-Measurement Unit
usw.	und so weiter
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
z.B.	zum Beispiel
Z_i	Zuteilungsfaktor mit $i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$
$\sum A_{\text{aut}}$	Summe aller automatisierten Arbeitsschritte
$\sum A_{\text{man}}$	Summer aller manuell ausgeführten Arbeitsschritte
€	Euro

14 Anhang

14.1 Messung der Positionsabweichungen

i. Versuchsaufbau:

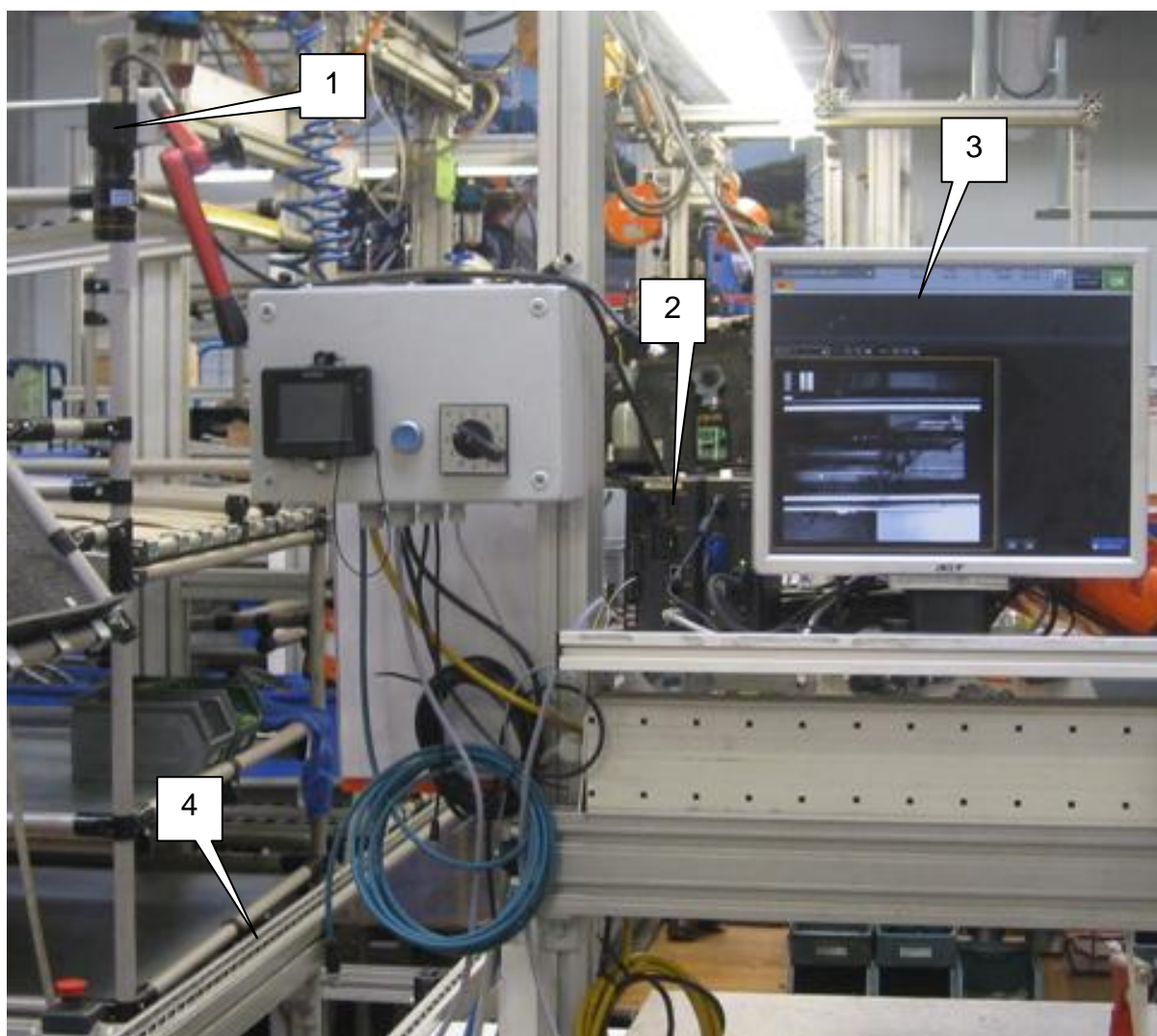


Abbildung 14.1 - Versuchsaufbau Bild 1

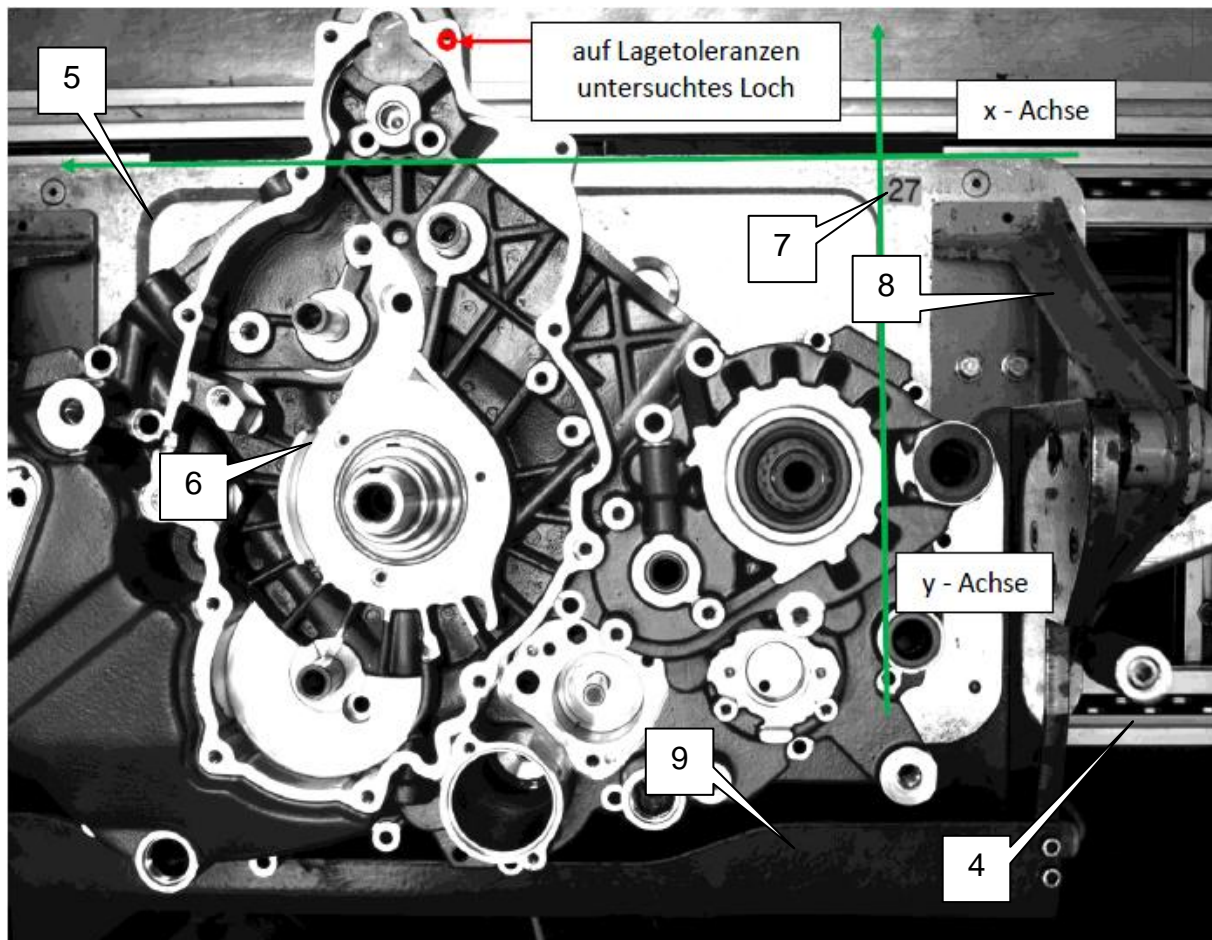


Abbildung 14.2 - Versuchsaufbau Bild 2

Nr.		Beschreibung
1	Kamera	Keyence CA-H2100M (21 Megapixel)
2	Controller	Keyence CV-H1X
3	Bildschirm	Der Bildschirm ist mit dem Controller verbunden.
4	Förderstraße	Die Montagewagerl werden auf dieser Förderstraße von einer Arbeitsstation zur nächsten befördert.
5	Grundplatte Montagewagerl	Zwei normal aufeinander stehende Fräbkanten der Grundplatte werden mit der Software detektiert und als Koordinatensystem verwendet
6	Kurbelgehäuse	Kurbelgehäuse eines Motorradmotors
7	Nummerierung	Eine durchgehende Nummerierung der Montagewagerl erlaubt es Positionsabweichungen zuzuweisen.
8	Galgen	Ein auf der Grundplatte aufgeschraubte Galgen.
9	Aufspannbügel	Angepasster und drehbar gelagerter Bügel, der es ermöglicht den Motor aufzuspannen.

Abbildung 14.3 - Legende Versuchsaufbau

Mit Hilfe einer Kamera (1) werden senkrecht von oben Fotos von im Montagewagerl eingespannten Kurbelgehäusen (6) geschossen. Über einen Controller (2) wird die Kamera gesteuert und gleichzeitig werden die Fotos über eine LAN-Verbindung an das zentrale Netzwerk weitergeleitet und dort gespeichert. Mit einem PC, der mit einer speziellen Software (CV-X Series Simulation-Software Version 3.0.0001) ausgestattet ist, werden die Fotos bearbeitet und ausgewertet.

Vor dem Lagertausch wurden insgesamt 76 Fotos geschossen. Eine Auswertung ergab hohe Positionsabweichungen. Nach dem Tausch der Schwenklager, welche den Galgen (8) und den Aufspannbügel (9) miteinander verbindet, wurden erneut 76 Fotos geschossen und ausgewertet. Nach dem Lagertausch sind Positionsabweichungen deutlich geringer geworden.

Die Tabellen und Auswertungen sind im Folgenden exemplarisch dargestellt.

Nr.	Y - Werte				X - Werte			
	VOR Lagertausch		NACH Lagertausch		VOR Lagertausch		NACH Lagertausch	
	Abstand [mm]	Abstand vom MW [mm]	Abstand [mm]	Abstand vom MW [mm]	Abstand [mm]	Abstand vom MW [mm]	Abstand [mm]	Abstand vom MW [mm]
1	51,6	-51,6	49,8	49,8	176,8	-176,76	175,0	175,0
2	49,6	-49,6	48,9	48,9	175,6	-175,61	174,6	174,6
3	51,2	-51,2	51,3	51,3	173,9	-173,86	174,2	174,2
4	49,1	-49,1	51,0	51,0	173,8	-173,82	176,1	176,1
5	49,3	-49,3	50,7	50,7	173,9	-173,93	173,4	173,4
6	49,0	-49,0	48,7	48,7	175,4	-175,38	177,1	177,1
7	50,3	-50,3	49,1	49,1	176,0	-176,04	177,6	177,6
8	51,4	-51,4	50,1	50,1	175,9	-175,90	174,8	174,8
9	51,7	-51,7	51,5	51,5	175,2	-175,22	174,6	174,6
10	49,9	-49,9	50,8	50,8	175,0	-174,97	176,4	176,4
...
76	51,2	-51,2	51,1	51,1	173,9	-173,86	176,2	176,2

Abbildung 14.4 - Messwerte vor und nach dem Lagertausch

Statistische Auswertung (vor Lagertausch)			Statistische Auswertung (nach Lagertausch)		
	x-Werte [mm]	y-Werte [mm]		x-Werte [mm]	y-Werte [mm]
Mittelwert MW	176,36	49,80	Mittelwert	175,5	50,1
Standardabweichung	2,67	1,81	Standardabweichung	1,3	1,0
Maximalwert - Minimalwert	12,75	14,5	Maximalwert - Minimalwert	5,7	4,7

Abbildung 14.5 - Statistische Auswertung Versuch (vor und nach dem Lagertausch)

14.2 Standardarbeitsplan, Produktstrukturplan und MTM-Analyse

Im Folgenden sind exemplarisch der Standardarbeitsplan, der Produktstrukturplan und die MTM-Analyse von Stand 04 dargestellt. Der Aufbau und Struktur dieser Dokumente sieht für die restlichen Stände gleich aus. Aus Platzgründen werden diese im Rahmen dieser Arbeit werden nicht beigegeben, können aber auf beim Hersteller eingesehen werden.

BAND 2		Standardarbeitsplan	
p: S24		Stand 04	
Mont./AA-Nr.	Beschreibung des Arbeitsschrittes / Montagehinweise	Drehmoment/Schrauber / Gültig für	
01 612353	Gehäuse mit M8 Schrauben bestücken und lt. SAB in der richtigen Reihenfolge verschrauben.	10Nm / 18Nm	MB 268
SAB MB12-0043	EC-Schrauber verwenden -Programm-Nr. beachten!	ALLE MODELLE	
02 612359	Das Gehäuse mit einer Befestigungsschraube zum Montagewagen fixieren.		
	Akkuschrauber verwenden	ALLE MODELLE	
03 612355	Chargennummer mit Montagelaufzettel vergleichen.		
	Markierung anbringen.	ALLE MODELLE	
04 612321	Sichtkontrolle, Montagewagen freigeben.		
		ALLE MODELLE	

Abbildung 14.6 - Standardarbeitsplan Beispiel (Stand 04)

PRODUKTSTRUKTUR

Sequ. Nr.	Artikelnr.	Bez. DE	Bez. En	Std.Pri	Start Datum	End Datum	Menge	STD	Nachfüllplatz
4142004									
OP. Nr.	499	4142004		MB Stand 04			Arbeitszeit		
900	61230043000	GEHÄUSESCHRAUBE M8X125	CASE SCREW M8X125 AS 08	0,51	0		5,00	1	
4142005									
OP. Nr.	599	4142005		MB Stand 05			Arbeitszeit		
690	61338085000	ÖLEINFÜLLROHR KPL.	OIL INFILLING PIPE CPL.	18,90	0		1,00	1	
990	60033043000	ANLAUFSCHLEIBE 20.2/34/1	STOP DISK 20,2 X 34 X 1	0,10	0		1,00	0	
1000	0471200120	SICHERUNGSRING DIN-20X1,2	CIRCLIP DIN471 20X1,2	0,02	0		1,00	0	
1060	61234015444	SCHALTARRETIERUNG KPL.	SHIFT DRUM LOCATING CPL.	3,25	0		1,00	1	
1070	0912060303	ISK.SCHRAUBE DIN 912 M6X30	AH SCREW DIN0912-M 6X30	0,03	0		1,00	0	
1090	75034024044	ARRETIERHEBEL KPL. 07	LOCKING LEVER CPL. 07	1,13	0		1,00	1	
1100	61234023000	FEDER ARRETIERHEBEL	SPRING - LOCKING LEVER	0,09	0		1,00	1	
1110	75034052000	HÜLSE F. ARRETIERHEBEL 07	SLEEVE FOR LOCKING LEVER 07	0,26	0		1,00	1	SG12-18
1150	0024060206	SK-BUNDSCHRAUBE M6X20 ISA30	HH COLLAR SCREW M6X20 TX30	0,03	0		1,00	0	
4142006									
OP. Nr.	699	4142006		MB Stand 06			Arbeitszeit		
270	62638084001	ÖLSCHAUGLAS	OIL SIGHT GLASS	3,62	0		1,00	1	
280	62638084050	DICHTUNG ÖLSCHAUGLAS	GASKET OIL SIGHT GLASS	0,51	0		1,00	1	
290	62638084102	HALTEBLECH ÖLSCHAUGLAS	BRACKET OIL LEVEL GLASS	1,51	0		1,00	1	
295	0019050121S	SENKKOPFSCHRAUBE M5X12 T25 SS	INT. TORX FLAT HEAD M5X12 T25	0,06	0		2,00	0	
700	0024060206	SK-BUNDSCHRAUBE M6X20 ISA30	HH COLLAR SCREW M6X20 TX30	0,03	0		2,00	0	
910	6123004400C	STEBOLZEN M6X110 08	STUD M6X110 08	0,16	0		4,00	1	
1260	61238008200	SAUGPUMPENDECKEL	SUCTION PUMP COVER	1,66	0		1,00	1	
1270	61238008150	FORMRING SAUGPUMPENDECKEL	MOLDED RING SUCTION PUMP COVER	0,31	0		1,00	1	SG12-11
1280	0025060206	SK-BUNDSCHRAUBE M6X20 ISA30	HH COLLAR SCREW M6X20 TX30	0,03	0		3,00	0	
1290	0402050980	NADELROLLE DIN5402 NRB 5X 9,8	NEEDLE ROLLER DIN5402 5X9,8	0,06	0		2,00	1	SG3-08

25.09.2014

Seite 3 von 18

Abbildung 14.7 - Produktstrukturplan Beispiel (Stand 04)

Copyright © Deutsche MTM-Vereinigung e.V.

	MTM-Analyse	Seite(n): 1 / 4	
	Analysen		
Kode: D8MOBMO061202S04B02	Index:	Variante:	
Bezeichnung: Motor 612 Bandmontage Stand 04 Band 02 Aufteilung 24 Stände Art: Ausführung [E] Status: Freigegeben für Prüfer [3] Zuletzt geändert: 11.12.2014			
Beginn: Inhalt: Ende: Begrenzung:			
Zeiten	eingegeben	berechnet	Einheit
beeinflussbare Tätigkeitszeit [ttb]		1360	TMU
unbeeinflussbare Tätigkeitszeit [ttu]		1639	TMU
Wartezeit [tw]		0	TMU
Grundzeit [tg]		2999	TMU
beeinflussbare Rüsttätigkeitszeit [trtb]		0	TMU
unbeeinflussbare Rüsttätigkeitszeit [trtu]		0	TMU
Rüstwartezeit [trw]		0	TMU
Rüstgrundzeit [trg]		0	TMU
Kommentar:			
Druckformular:	Prozessbaustein detailliert	Sprache:	Deutsch

Abbildung 14.8 - MTM-Analyse Stand 04 (Seite 1 von 4)

Copyright © Deutsche MTM-Vereinigung e.V.

MTM-Analyse		Seite(n): 2 / 4			
Analysen					
Kode:	D8MOBMO061202S04B02	Index:	Variante:		
Nr.	Bezeichnung	Kode Art Variable	Zeit tg TMU trg	A x H Var. eing.	Gesamt tg TMU trg
1	5 Schrauben M8 in Gehäuse stecken	C8MOBMO0612...M025	185 0	1	185 0
1.1	Schrauben aufnehmen und in Gehäuse einstecken	3000AG2...5	65 0	1	65 0
1.2	Schrauben in Gehäuse stecken (5 Stk.)	3000PB1...5	20 0	5	100 0
1.3	restliche Schrauben abwerfen	3000PA2...5	20 0	1	20 0
2	Gehäuse verschrauben	C8MOBMO0612...M020	1855 0	1	1855 0
2.1	Schrauber handhaben und zur ersten Schraube	3000HC2...5	70 0	1	70 0
2.2	zur 2-24 Schraube	3000PC1...5	30 0	23	690 0
2.3	Schrauben verschrauben	PTSEC	28 0	1,5*24	1000 0
2.4	zu Bit greifen und lösen	3000AA1...5	20 0	1	20 0
2.5	Bit ablegen	3000PA2...5	20 0	1	20 0
2.6	anderen Bit nehmen und in Schrauber einsetzen	3000AC2...5	55 0	1	55 0
2.7					
3	Laufzettel Motornummer vergleichen	A8VAGLZNV001	150 0	1	150 0
3.1	Hülle von Motor nehmen	3000AA1...5	20 0	1	20 0
3.2	Motornummer vergleichen	3000VA...5	15 0	1*4	60 0
3.3	Stift handhaben	3000HB2...5	60 0	1	60 0
3.4	Makieren	3000ZB1...5	10 0	1	10 0
4	Motor mit zwei Fixierschraube auf Montagebock fixieren oder entfernen	B8VM.MOFX002	427 0	0,5	213 0
4.1	Fixierschraube aufnehmen und ansetzen	3000AC2...5	55 0	2*0,5	55 0
4.2	Fixierschraube entfernen	3000AA2...5	35 0	2*0,5	35 0
Kommentar:					
Druckformular:		Prozessbaustein detailliert		Sprache: Deutsch	

Abbildung 14.9 - MTM-Analyse Stand 04 (Seite 2 von 4)

Copyright © Deutsche MTM-Vereinigung e.V.

Kode: D8MOBMO061202S04B02		Index:		Variante:					
Nr.	Bezeichnung	Kode Art Variable		Zeit tg TMU trg		A x H Var. eing.		Gesamt tg TMU trg	
4.3	Schraube von Hand leicht eindrehen	3000ZB1....5		10 0		2*3		60 0	
4.4	Schrauber handhaben	3000HC2....5		70 0		1		70 0	
4.5	zur zweiten Schraube	3000PC2....5		40 0		1		40 0	
4.6	Fixierschraube eindrehen	PTSEC		28 0		3*2		167 0	
5	Sichtkontrolle, Montagewagen freigeben	A8VAGWST001		596 0		1		596 0	
5.1	Freigabetaste betätigen	3000BA2....5		25 0		1		25 0	
5.2	Sichtkontrolle	3000VA.....5		15 0		1 * 1,0		15 0	
5.3	Werkstückträgerwechselzeit	PTUSEC		28 0		20		556 0	

Abbildung 14.10 - MTM-Analyse Stand 04 (Seite 3 von 4)

Die vierte Seite wird nicht beigefügt, kann aber bei Interesse vom Autor vorgelegt werden. Der Grund, warum diese Seite ausgelassen wird, ist, dass sich darauf keine Informationen befinden, die für diese Arbeit relevant sind.

14.3 Fertigungskosten- und Investitionsrechnung

Berechnung des Maschinenstundensatzes

Im Folgenden sind die für Kapitel 6.1.5 notwendigen Berechnungen der Fertigungskosten durchgeführt.

Maschinenname:		Schraubroboter Stand 04 (Automatisierung Stand 04 & Stand 22)	
Maschinenstunden pro Jahr	3840		
Investitionskosten Stand 04	€ 84.000,00		
Nutzungsdauer	5 Jahre		
Zinssatz	6,00%		
Fixe Kosten pro Jahr		Variable Kosten pro Jahr	
kalk. Abschreibungen	€ 16.800,00	Instandsetzung und Reparatur	€ 2.000,00
kalk. Zinsen	€ 2.520,00	Energie	€ 1.500,00
Instandsetzung und Reparatur	€ 1.500	sonstige variable Kosten	€ 0,00
Platzkosten	€ 350,00		
Energie	€ 500,00		
Summe	<u>€ 21.670,00</u>		<u>€ 3.500,00</u>
Kosten je Stunde	€ 5,64		€ 0,91
Maschinenstundensatz	6,55 €/h		

Abbildung 14.11 - Maschinenstundensatz Schraubroboter Stand 04 (Automatisierung Stand 04 und Stand 22)

Maschinenname:		Schraubroboter Stand 22 (Automatisierung Stand 04 & Stand 22)	
Maschinenstunden pro Jahr	3840		
Investitionskosten Stand 22	€ 78.000,00		
Nutzungsdauer	5 Jahre		
Zinssatz	6,00%		
Fixe Kosten pro Jahr		Variable Kosten pro Jahr	
kalk. Abschreibungen	€ 15.600,00	Instandsetzung und Reparatur	€ 2.000,00
kalk. Zinsen	€ 2.340,00	Energie	€ 1.500,00
Instandsetzung und Reparatur	€ 1.000	sonstige variable Kosten	€ 0,00
Platzkosten	€ 255,00		
Energie	€ 500,00		
sonstige fixe Kosten	€ 0,00		
Summe	<u>€ 19.695,00</u>		<u>€ 3.500,00</u>
Kosten je Stunde	€ 5,13		€ 0,91
Maschinenstundensatz	6,04 €/h		

Abbildung 14.12 - Maschinenstundensatz Schraubroboter Stand 22 (Automatisierung Stand 04 und Stand 22)

Maschinenname:		Schraubroboter Stand 04 (Automatisierung Stand 04)	
Maschinenstunden pro Jahr	3840		
Investitionskosten Stand 04	€ 94.000,00		
Nutzungsdauer	5 Jahre		
Zinssatz	6,00%		
Fixe Kosten pro Jahr		Variable Kosten pro Jahr	
kalk. Abschreibungen	€ 18.800,00	Instandsetzung und Reparatur	€ 2.000,00
kalk. Zinsen	€ 2.820,00	Energie	€ 1.500,00
Instandsetzung und Reparatur	€ 1.500,00	sonstige variable Kosten	€ 0,00
Platzkosten	€ 350,00		
Energie	€ 500,00		
Summe	<u>€ 23.970,00</u>		<u>€ 3.500,00</u>
Kosten je Stunde	€ 6,24		€ 0,91
Maschinenstundensatz	€ 7,15		

Abbildung 14.13 - Maschinenstundensatz Schraubroboter Stand 04 (Automatisierung Stand 04)

Maschinenname:		Schraubroboter Stand 22 (Automatisierung Stand 22)	
Maschinenstunden pro Jahr		3840	
Investitionskosten Stand 04		€ 88.000,00	
Nutzungsdauer		5 Jahre	
Zinssatz		6,00%	
Fixe Kosten pro Jahr		Variable Kosten pro Jahr	
kalk. Abschreibungen	€ 17.600,00	Instandsetzung und Reparatur	€ 2.000,00
kalk. Zinsen	€ 2.640,00	Energie	€ 1.500,00
Instandsetzung und Reparatur	€ 1.000,00	sonstige variable Kosten	€ 0,00
Platzkosten	€ 255,00		
Energie	€ 500,00		
Summe	€ 21.995,00		€ 3.500,00
Kosten je Stunde	€ 5,73		€ 0,91
Maschinenstundensatz	€ 6,64		

Abbildung 14.14 - Maschinenstundensatz Schraubroboter Stand 22 (Automatisierung Stand 22)

Berechnung der Fertigungskosten:

Stand 04 (manuell)			
Mitarbeiter / h			€ 30,00
		Mitarbeiter	
1 5 M8 Schrauben stecken	185 tmu	6,7 sek	
2 Gehäuse Verschrauben	1855 tmu	66,8 sek	
3 Laufzettel Motornummer Vgl.	150 tmu	5,4 sek	
4 Motor drehen	213 tmu	7,7 sek	
5 Sichtkontrolle, Montagewagen freigeben	596 tmu	21,5 sek	
Summe		108,0 sek	
sachliche Verteilzeit (20%)		21,6 sek	
Gesamtzeit		129,6 sek	
		= 0,0360 h	
Fertigungskosten an der Station pro Motor			€ 1,080

Abbildung 14.15 - Fertigungskosten Stand 04 (IST-Zustand)

Stand 22 (manuell)		
Mitarbeiter / h	€ 30,00	
	Mitarbeiter	
1 Deckel Verschrauben	1887 tmu	67,9 sek
2 Kettenspanner entriegeln	90 tmu	3,2 sek
3 Verschlusschraube montieren	305 tmu	11,0 sek
4 Getriebe durchschalten	300 tmu	10,8 sek
5 Sichtkontrolle, Montagewagen freigeben	596 tmu	21,5 sek
Summe	3178	114,4 sek
sachliche Verteilzeit (20%)		22,9 sek
Gesamtzeit		137,3 sek
		= 0,0381 h
Fertigungskosten an der Station pro Motor		€ 1,144

Abbildung 14.16 - Fertigungskosten Stand 22 (IST-Zustand)

Stand 04 (automatisiert): Automatisierung Stand 04 & Stand 22			
Mitarbeiter / h	€ 30,00		
Maschinenstunde	€ 6,55		
		Maschine	Mitarbeiter
1 5 M8 Schrauben stecken und verschrauben; Gehäuseschrauben anziehen	115,0 sek		0,0 sek
2 Laufzettel Motornummer Vgl.	0,0 sek		5,4 sek
3 Motor drehen	0,0 sek		7,7 sek
4 Sichtkontrolle, Montagewagen freigeben	2,0 sek		0,0 sek
Summe	117,0 sek		13,1 sek
sachliche Verteilzeit (20%)	0,0 sek		2,6 sek
Gesamtzeit	117,0 sek		15,7 sek
	0,0325 h		0,0044 h
	0,2130 €		0,1307 €
Investitionskosten	84000,00 €		
Abschreibungsdauer in Monate	60		
kalkulatorische Abschreibung pro Monat	1400,00 €		
Stückzahl pro Monat	4800		
kalkulatorische Abschreibung pro Stück	0,2917 €		
Fertigungskosten an der Station pro Motor			€ 0,6354

Abbildung 14.17 - Fertigungskosten Stand 04 (Automatisierung Stand 04 und Stand 22)

Stand 22 (automatisiert): : Automatisierung Stand 04 & Stand 22			
Mitarbeiter / h	€ 30,00		
Maschinenstunde	€ 6,04		
	Maschine		Mitarbeiter
1 Deckel Verschrauben	107,0 sek		0,0 sek
2 Kettenspanner entriegeln	0,0 sek		3,2 sek
3 Verschlusschraube montieren	0,0 sek		11,0 sek
4 Getriebe durchschalten	10,0 sek		0,0 sek
5 Sichtkontrolle, Montagewagen freigeben	2,0 sek		0,0 sek
Summe	119,0 sek		14,2 sek
sachliche Verteilzeit (20%)	0,0 sek		2,8 sek
Gesamtzeit	119,0 sek		17,1 sek
	0,0331 h		0,0047 h
	0,1997 €		0,1422 €
Investitionskosten	78000,00 €		
Abschreibungsdauer in Monate	60		
kalkulatorische Abschreibung pro Monat	1300,00 €		
Stückzahl pro Monat	4800		
kalkulatorische Abschreibung pro Stück	0,2708 €		
Fertigungskosten an der Station pro Motor			€ 0,6127

Abbildung 14.18 - - Fertigungskosten Stand 22 (Automatisierung Stand 04 und Stand 22)

Stand 04 (automatisiert): Automatisierung Stand 04			
	Mitarbeiter / h	€ 30,00	
	Maschinenstunde	€ 7,15	
		Maschine	Mitarbeiter
1	5 M8 Schrauben stecken und verschrauben; Gehäuseschrauben anziehen	115,0 sek	0,0 sek
2	Laufzettel Motornummer Vgl.	0,0 sek	5,4 sek
3	Motor drehen	0,0 sek	7,7 sek
4	Sichtkontrolle, Montagewagen freigeben	2,0 sek	0,0 sek
	Summe	117,0 sek	13,1 sek
	sachliche Verteilzeit (20%)	0,0 sek	2,6 sek
	Gesamtzeit	117,0 sek	15,7 sek
		0,0325 h	0,0044 h
		0,2325 €	0,1307 €
	Investitionskosten	94000,00 €	
	Abschreibungsdauer in Monate	60	
	kalkulatorische Abschreibung pro Monat	1566,67 €	
	Stückzahl pro Monat	4800	
	kalkulatorische Abschreibung pro Stück	0,3264 €	
	Fertigungskosten an der Station pro Motor		€ 0,6896

Abbildung 14.19 - Fertigungskosten Stand 04 (Automatisierung Stand 04)

Stand 22 (automatisiert): Automatisierung Stand 22			
Mitarbeiter / h	€ 30,00		
Maschinenstunde	€ 6,64		
	Maschine		Mitarbeiter
1 Deckel Verschrauben	107,0 sek		0,0 sek
2 Kettenspanner entriegeln	0,0 sek		3,2 sek
3 Verschlusschraube montieren	0,0 sek		11,0 sek
4 Getriebe durchschalten	10,0 sek		0,0 sek
5 Sichtkontrolle, Montagewagen freigeben	2,0 sek		0,0 sek
Summe	119,0 sek		14,2 sek
sachliche Verteilzeit (20%)	0,0 sek		2,8 sek
Gesamtzeit	119,0 sek		17,1 sek
	0,0331 h		0,0047 h
	0,2195 €		0,1422 €
Investitionskosten	88000,00 €		
Abschreibungsdauer in Monate	60		
kalkulatorische Abschreibung pro Monat	1466,67 €		
Stückzahl pro Monat	4800		
kalkulatorische Abschreibung pro Stück	0,3056 €		
Fertigungskosten an der Station pro Motor			€ 0,6672

Abbildung 14.20 - Fertigungskosten Stand 22 (Automatisierung Stand 22)

Investitionsrechnung

Im Folgenden sind die für Abschnitt notwendigen Investitionsrechnungen durchgeführt.

INVESTITIONSRECHNUNG: Automatisierung Stand 04 + Stand 22					
Kostenveränderung / Jahr	Erhöhung	Senkung			
Materialkosten					
Fertigungskosten		56.197 €			
Instandhaltung	2.500,00 €				
Platzkosten	605,00 €				
Energiekosten	1.000,00 €				
Kostenveränderung		€ 52.092,15			
Investitionskosten	162.000,00 €				
Nutzungsdauer	5 Jahre				
Restwert (20%)	32.400,00 €				
Zinssatz	6,00%				
	Jahr	Cash Flow	Abzinsfaktor	Barwert Cash Flow	Barwert - Summen
	0	-€ 162.000,00	1,0000	-€ 162.000,00	-€ 162.000,00
	1	€ 52.092,15	0,9434	€ 49.143,54	-€ 112.856,46
	2	€ 52.092,15	0,8900	€ 46.361,83	-€ 66.494,63
	3	€ 52.092,15	0,8396	€ 43.737,58	-€ 22.757,05
	4	€ 52.092,15	0,7921	€ 41.261,87	€ 18.504,82
	5	€ 84.492,15	0,7473	€ 63.137,45	€ 81.642,27
		Netto Barwert		€ 81.642,27	
		Interner Zinsfuß		14,88%	
		Amortisationszeit (dynamisch)		3,55 Jahre	
		ROI		50,40%	

Abbildung 14.21 - Investitionsrechnung (Automatisierung Stand 04 und Stand 22)

INVESTITIONSRECHNUNG: Automatisierung Stand 04					
Kostenveränderung / Jahr	Erhöhung	Senkung			
Materialkosten					
Fertigungskosten		22.468 €			
Instandhaltung	1.500,00 €				
Platzkosten	350,00 €				
Energiekosten	500,00 €				
Kostenveränderung		€ 20.118,47			
Investitionskosten	€ 94.000,00				
Nutzungsdauer	5 Jahre				
Restwert (20%)	€ 18.800				
Zinssatz	6,00%				
	Jahr	Überschuss	Abzinsfaktor	Barwert	Barwert - Summen
	0	-€ 94.000,00	1,0000	-€ 94.000,00	-€ 94.000,00
	1	€ 20.118,47	0,9434	€ 18.979,69	-€ 75.020,31
	2	€ 20.118,47	0,8900	€ 17.905,37	-€ 57.114,94
	3	€ 20.118,47	0,8396	€ 16.891,86	-€ 40.223,09
	4	€ 20.118,47	0,7921	€ 15.935,71	-€ 24.287,37
	5	€ 38.918,47	0,7473	€ 29.082,15	€ 4.794,77
		Barwertsumme		€ 4.794,77	
		Interner Zinsfuß		2%	
		Amortisationszeit (dynamisch)		4,84 Jahre	
		ROI		5,10%	

Abbildung 14.22 Investitionsrechnung (Automatisierung Stand 04)

INVESTITIONSRECHNUNG: Automatisierung Stand 22					
Kostenveränderung / Jahr	Erhöhung	Senkung			
Materialkosten					
Fertigungskosten		€ 35.916,57			
Instandhaltung	€ 1.500,00				
Platzkosten	€ 255,00				
Energiekosten	€ 500,00				
Kostenveränderung		€ 33.916,57			
Investitionskosten	88.500,00 €				
Nutzungsdauer	5 Jahre				
Restwert (20%)	17700,00 €				
Zinssatz	7,00%				
	Jahr	Überschuss	Abzinsfaktor	Barwert	Barwert - Summen
	0	-€ 88.500,00	1,0000	-€ 88.500,00	-€ 88.500,00
	1	€ 33.916,57	0,9346	€ 31.697,73	-€ 56.802,27
	2	€ 33.916,57	0,8734	€ 29.624,05	-€ 27.178,22
	3	€ 33.916,57	0,8163	€ 27.686,03	€ 507,81
	4	€ 33.916,57	0,7629	€ 25.874,79	€ 26.382,60
	5	€ 51.616,57	0,7130	€ 36.801,90	€ 63.184,51
		Barwertsumme		€ 63.184,51	
		Interner Zinsfuß		21%	
		Amortisationszeit (dynamisch)		2,98	
		ROI		71,39%	

Abbildung 14.23 Investitionsrechnung (Automatisierung Stand 22)