

1 Einleitung

1.1 Motivation

„Produktionssysteme auf Basis von Industrie 4.0 sollten kundenindividuelle Produkte in Losgröße 1 mit hoher konstruktiver Differenzierung und zu niedrigsten Kosten, also möglichst vollautomatisiert, fertigen können. Durchlaufzeiten und Rüstaufwände sollten minimal, die Produktqualität möglichst hoch und der Ausschuss vernachlässigbar sein. [...] Genau diese Forderungen können moderne Fertigungssysteme für elektronische Baugruppen bereits seit geraumer Zeit vollumfänglich erfüllen.“ [BOG17]S.655

Diese Feststellung in einem Beitrag in *Reinharts Handbuch Industrie 4.0* [REI17] formuliert in prägnanten Worten die Erwartungen an Produktionssysteme im Zeitalter der Digitalisierung. Darüber hinaus wird aufgezeigt, dass die Elektronikindustrie, genauer die Fertigung elektronischer Baugruppen, die Anforderungen bereits erfüllt. Diese Rahmenbedingungen ermöglichen, auf Basis der hervorragenden Datenlage die Auswirkungen der Nutzung Digitaler Abbilder in verschiedenen Integrationsgraden zu bewerten.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es, die Auswirkungen der Nutzung von Digitalen Abbildern¹ als Folge von Digitalisierungsmaßnahmen in bestehenden Produktionssystemen der elektronischen Flachbaugruppenfertigung zu simulieren und zu bewerten. Die untersuchten Digitalisierungsmaßnahmen umfassen die Nutzung des Digitalen Abbilds des Produkts beim Kommissionieren sowie die Nutzung des Digitalen Abbilds von SMD-Gebinden in der Bestandsführung. Insbesondere die Wechselwirkung mit Automatisierungsmaßnahmen in der Intralogistik steht hierbei im Fokus.

Für die Einführung und Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen stellen die ex ante bestehenden Unklarheiten über deren wirtschaftlichen Nutzen die größte initiale Hürde dar.² Gleichzeitig sind Investitionen im Zusammenhang mit Digitalisierungsmaßnahmen ungeachtet des bestehenden Potentials zur Produktivitätssteigerung³ derzeit nur schwer durch institutionelle Geldgeber abzudecken [LIC15] S.62 ff. Um die Investitionssicherheit zu erhöhen, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Verfahren entwickelt, das in der

¹ In der Arbeit werden unter dem Begriff *Digitales Abbild* Digitale Modelle, Digitale Schatten und Digitale Zwillinge subsummiert. Dies resultiert aus der noch nicht abgeschlossenen Definition, siehe Kapitel 2.4

² [LIC15] S. 57: 76,8 % der befragten Unternehmen geben an, dass die Unklarheit über den wirtschaftlichen Nutzen ein Hemmnis bei der Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen darstellt

³ [BUN14] S. 36: erwartete durchschnittliche Steigerung der Bruttowertschöpfung durch Industrie 4.0 bis 2025 über sechs Branchen von 23%

Lage ist, die Auswirkungen verbesserter Datenerhebung und -nutzung vor deren Implementierung anhand eines Kennzahlensystems zu bewerten.

Der Fokus liegt hierbei auf der SMT⁴- Flachbaugruppenfertigung⁵ der Elektronikindustrie. Sie zeichnet sich durch die Besonderheit aus, dass eine, gegenüber anderen Produktionssystemen, stärkere Vernetzung und Automatisierung der Produktionszellen besteht [BOG17] S. 659. Somit erlaubt die vorhandene Datengrundlage eine Analyse weitergehender Datennutzung in an die Produktionszelle angrenzenden Bereichen, ohne einen Mehraufwand in der Datenerhebung zu generieren.

Die FBG-Fertigung ist vor allem im EMS⁶ -Bereich durch eine hohe Varianz bei stark unterschiedlichen Losgrößen geprägt. Hinzu kommt die Tatsache, dass pro gefertigter FBG vergleichsweise viele unterschiedliche Bauteile von kleiner Dimension verbaut werden. [HAM02] S.10 ff.

Damit geht einher, dass größere SMD-Gebinde mit Bauteilen mehrfach ein- und ausgelagert werden, um unterschiedliche Varianten zu fertigen, wodurch die Anzahl der Materialver- und entsorgungsvorgänge⁷ ansteigt und durch nicht erfasste Mehrverbräuche die Materialbestände zunehmend ungenau werden. Für die Bewertung der Auswirkungen der Nutzung Digitaler Abbilder auf das Produktionssystem mit seinen Produktions- und Logistikkennzahlen sind die entscheidenden Supportprozesse, Bestandsführung und MVE, zu beleuchten.⁸

Die Arbeit entwickelt deswegen ein Verfahren zur Bewertung der Auswirkung von Digitalen Abbildern auf Produktionszellen und Produktionssysteme. Die untersuchten Technologien schließen erstens die analoge Lücke bei der Bestandsführung von SMT-Bauteilen⁹ und verkürzen zweitens die Zeit zwischen Bedarfsauslösung und dem Abschluss der MVE- Prozesse durch das Nutzen des Digitalen Abbilds des zu produzierenden Produkts. Der Begriff der analogen Lücke bezeichnet dabei einen Vorgang, der im bestehenden Produktionssystem nicht informationstechnisch erfasst wird.

Hierbei werden unterschiedliche Integrationstiefen der Digitalen Abbilder untersucht, um zu analysieren, an welchen Stellen und in welcher Intensität die Nutzung Digitaler Abbilder einen Hebel für Optimierungen bietet.

Abgrenzung

Um die in Kapitel 1.2 beschriebene Zielsetzung zu erreichen und weiter zu konkretisieren, erfolgt nachstehend die Eingrenzung des inhaltlichen Betrachtungsrahmens anhand von elf Merkmalen (Tabelle 1). Diese Eingrenzung dient dazu, den anschließenden Stand der Erkenntnisse zielgerichtet zu gestalten und die spätere Anwendbarkeit herauszustellen.

⁴ Surface Mount Technology; THT: Through Hole Technology

⁵ Flachbaugruppe: FBG

⁶ Electronic Manufacturing Services

⁷ Unter Materialversorgung wird die Materialbereitstellung vor dem Rüsten, unter Materialentsorgung die Einlagerung mit ihren Teilprozessen verstanden; Materialver- und entsorgung wird im Folgenden als MVE bezeichnet

⁸ Unterscheidung von Kern- und Supportprozessen folgt der Definition von *Becker* [BEC12] S.7

⁹ Erzeugung eines Digitalen Abbilds der SMD-Gebinde

Die wissenschaftliche Abgrenzung erfolgt am Ende des Kapitels 2 (Stand der Erkenntnisse) anhand einer Analyse aktueller Forschungsansätze und Publikationen im Kontext Digitaler Abbilder in der Produktion. Hierbei wird auf vier Merkmale eingegangen, die Digitale Abbilder im industriellen Kontext charakterisieren. Somit ist am Ende des Kapitels 2 die Arbeit sowohl in ihrem Betrachtungsrahmen, als auch in ihrem zugrundeliegenden wissenschaftlichen Kontext definiert und eingeordnet.

Tabelle 1: Abgrenzung des Betrachtungsrahmens

Fokussierung Betrachtungsraum						
Branche	Kraftfahr- zeugbau	Elektronik- industrie	Maschinen- -bau	Chemie- industrie	Bau- industrie	Luft- und Raumfahrt
Systemgrenze	F&E	Beschaffung	Produktion	Intra- logistik	Extra- logistik	Vertrieb
Produktart	Fließgüter			Stückgüter		
Fertigungsart	Massenfertigung		Serienfertigung		Einzelfertigung	
Bestückungs- technik	THT			SMT		
Ziele, Maßnahmen und Wirkung						
Ziel- dimensionen	DLZ-Minimierung		Termin- abweichungs- minimierung	Auslastungs- maximierung		Bestands- minimierung
Maßnahmen- fokus	Organisatorisch			Technisch		
Hebel der Digitalen Trans- formation	Digitale Daten		Automatisierung	Vernetzung		Digitaler Kundenzugang
Wirkungs- fokus	Verfügbarkeit		Effektivität		Qualität	
Wirkung der untersuchten Maßnahmen	Umsatzseitig			Effizienzseitig		

Branche

Im Fokus der Betrachtung steht die Elektronikbranche. Durch die stark vernetzten Produktionsprozesse lassen sich die Auswirkungen von Digitalisierungs- und Automatisierungsmaßnahmen in den Supportprozessen auf die Gesamtleistung des Produktionssystems gut untersuchen und bewerten. Aufgrund der stark vernetzten SMT-Flachbaugruppenfertigung ist die Datenlage in der Produktion sehr gut. Die Verwendung dieser Daten zur Optimierung leistungsbeeinflussender Supportprozesse soll in dieser Arbeit untersucht werden.

Systemgrenze

Die Arbeit beschränkt sich auf die Betrachtung von intralogistischen Prozessen und Produktionsprozessen. Das Verfahren bewertet die Auswirkung von Maßnahmen zur Optimierung von Intralogistikprozessen auf die Leistung der Produktionsprozesse. Optimierungen an den Produktionsprozessen selbst sind nicht Gegenstand der Arbeit.

Produktart

Es wird die Produktion von Stückgütern, die SMT-Flachbaugruppenfertigung, betrachtet.

Fertigungsart

Es wird die Fertigungsart der Serienfertigung nach der Definition von *Jodlbauer* betrachtet. Demnach wird als Serienfertigung die Produktion von gleichen oder ähnlichen Produkten in Losen verstanden. Beim Wechsel des Produkts ist die Serienfertigung durch das Auftreten von Rüstzeiten etc. gekennzeichnet. Die Komplexität und Anforderungen an die Intralogistik ist somit im Vergleich zu einer Massenfertigung höher. [JOD08] S.12

Fertigungspfad

Es sind sequentielle, divergente, konvergente und rekursive Fertigungspfade zu unterscheiden. Die betrachtete SMT-Flachbaugruppenfertigung ist den sequentiellen Fertigungspfaden zuzuordnen. Einzelne Produktionsschritte werden streng chronologisch nacheinander vorgenommen. [JOD08] S.5 [DYC10] S. 22

Maßnahmenfokus

Der Fokus der untersuchten Maßnahmen zur Produktivitätssteigerung ist organisatorischer und technischer Natur. Es werden die Einflüsse von Technologien zur Bestandsführung (Bauteilzähler) und zur MVE (automatisiertes Lagersystem) modelliert und unterschiedlich tiefe organisatorische Implementierungen gegenübergestellt, um die Effekte zunehmender Integrationsgrade zu bewerten. Hierbei kommen zwei Digitale Abbilder innerhalb des Produktionssystems zum Einsatz. Einerseits entsteht durch eine fortlaufende Bestandsführung ein Digitales Abbild der SMD¹⁰-Gebinde, andererseits wird das Digitale Abbild der produzierten FBG zur Kommissionierung genutzt.

¹⁰ Surface Mount Device

Wirkungsfokus

Die Eingrenzung des Wirkungsfokus folgt der Definition der Overall Equipment Effectiveness (OEE), die sich aus den Komponenten Verfügbarkeit, Effektivität und Qualitätsrate berechnet. [VDM09]S.19

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Bewertung der Veränderung der Verfügbarkeit durch das Nutzen Digitaler Abbilder. Die erzeugte Qualität wird mit 100% Gutteilen angenommen, da „[...] der First Pass Yield [...] deutlich über 99% [beträgt].“ [BOG17]S.656. Darüber hinaus kann so der Effekt der Digitalen Abbilder isoliert untersucht werden. Ebenso wird das Verhältnis zwischen Planzeiten und Ist- Zeiten bei der Berechnung der Effektivität als 1 vorausgesetzt, da Steigerungen bzw. Minderungen der Produktionsleistung nicht Gegenstand der Untersuchung sind.

Zieldimensionen

Es werden zwei von vier Dimensionen des Zielsystems der Produktion gemäß VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 adressiert: Auslastungsmaximierung sowie Durchlaufzeitminimierung. [VDI14] S.9

Die Beeinflussung wird mit Kennzahlen gemessen, die in Kapitel 3.1 zu einem Kennzahlensystem zusammengefasst werden. Da in der Eingrenzung des Betrachtungsrahmens die Systemgrenze bei Produktion und Intra-logistik gezogen wird, finden die Zieldimensionen Terminabweichungsminimierung und Bestandsminimierung keine Beachtung. [VDI14] S.9

Bestückungstechnik

Der Fokus der Arbeit liegt auf der heute dominierenden SMT-Flachbaugruppenfertigung mit ihren Spezifika. Nicht betrachtet wird die THT Fertigung.¹¹ Ebenfalls werden händische Bestückungen, Lotdruck und Reflowlöten innerhalb der SMT-Flachbaugruppenfertigung nicht betrachtet. Dies liegt darin begründet, dass der datentechnisch nicht erfasste Materialmehrerverbrauch vor allem im Rahmen der Rüstvorgänge anfällt und ein Materialmangel zu einem Stillstand der kompletten SMT-Linie führt. (siehe Kapitel 5)

Wirkung der untersuchten Maßnahmen

Der Nutzen von Digitalisierungstechnologien wirkt sich sowohl auf das eigene Produktionssystem (effizienzseitig) als auch auf das Produkt (umsatzseitig) aus. [MCK15] S.16; [BAU14] S.31 ff.

Befragungen zeigen, dass die Motivation und der Nutzen von datenbasierten Lösungen vor allem in der eigenen Produktion gesehen werden. Nach *Koch* sehen 80% der befragten Unternehmen qualitative Vorteile von Technologien der Industrie 4.0 bei einer besseren Planung und Steuerung in Produktion und Logistik, wohingegen lediglich 46% angeben, einen hohen Effekt beim Anbieten individualisierter Produkte zu sehen. [KOC14] S.21

¹¹ Durch den Einzug der SMT hat die THT in der Elektronikfertigung an Bedeutung verloren [RÖS11]S. 3

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt *Bauernhansl* bei einer Befragung von 526 Unternehmen, die den Mehrwert der Nutzung von Daten aus der Produktion zu 27,6 % im eigenen Produktionssystem sehen. Lediglich 12,9 % geben an, einen Nutzen in der Produktentwicklung zu sehen. [BAU16] S.38

Die vorliegende Arbeit betrachtet ausschließlich effizienzseitige Auswirkungen von datenbasierten Technologien im Produktionssystem.

Hebel der Digitalen Transformation

In der Studie *Die Digitale Transformation in der Industrie* im Auftrag des BDI¹² werden vier Hebel der Digitalen Transformation¹³ identifiziert, von denen drei im Fokus der Arbeit stehen. 1) Digitale Daten: die Nutzung des Digitalen Abbilds der FBG und des SMD-Gebindes in MVE-Prozessen 2) Vernetzung: das Zusammenspiel von Systemen zur Bestandsführung, Lagerhaltung, Kommissionierung und dem Produktionssystem und 3) Automatisierung: das physische Verbinden der Komponenten zur Bestandsführung, Lagerhaltung und Kommissionierung sowie die Automatisierung des Ein- und Auslagerungsvorgangs. Nicht betrachtet wird der Digitale Kundenzugang.

1.3 Aufbau der Arbeit

Um die in Kapitel 1 vorgestellten Ziele zu erreichen, wird der nachfolgend skizzierte Lösungsweg eingeschlagen.

In **Kapitel 1** folgt nach einer einleitenden Beschreibung zur Motivation der Arbeit (1.1) eine Erläuterung des Ziels sowie die Abgrenzung des Betrachtungsrahmens (1.2).

In **Kapitel 2** wird auf den für die Arbeit relevanten Stand der Erkenntnisse zu den Themenkomplexen Produktion und Logistik (Kapitel 2.1), Elektronikproduktion (Kapitel 2.2), Simulation in Produktion und Logistik (Kapitel 2.3) und Digitale Abbilder im industriellen Kontext (Kapitel 2.4) eingegangen. Es werden die für die Arbeit relevanten Begrifflichkeiten eingeführt. Die Schwerpunkte werden hierbei folgendermaßen gelegt:

Produktion und Logistik

Nach der Vorstellung des Stuttgarter Unternehmensmodells, das den begrifflichen Rahmen der Arbeit bildet, folgt eine Erläuterung der betrachteten Intralogistik- und Produktionsprozesse anhand des Stuttgarter Unternehmensmodells. Anschließend wird auf die verwendeten Normen zur Kennzahlbildung in den Bereichen Produktion und Logistik eingegangen.

Elektronikproduktion

¹² Bundesverband der Deutschen Industrie e.V

¹³ Digitale Daten, Automatisierung, Vernetzung und Digitaler Kundenzugang [ROL15] S. 20

Nach einer Erläuterung der Aufbauhierarchie von elektronischen Geräten sowie der Aufbauvarianten von bestückten Leiterplatten werden die zwei vorherrschenden Bestückungstechnologien vorgestellt.

Simulation in Produktion und Logistik

Dieses Kapitel stellt die Grundlagen zur Systemanalyse und –beschreibung durch Modelle dar. Hierbei wird insbesondere auf die Anwendung von Simulationsmodellen in Produktion und Logistik eingegangen. Simulationen werden in Forschung und Praxis zunehmend eingesetzt, um komplexe Produktionssysteme zu analysieren und anschließend zu optimieren. Nach einer allgemeinen Einführung wird auf die ereignisdiskrete und agentenbasierte Simulation eingegangen und die Unterschiede herausgearbeitet. Es wird herausgestellt, weshalb in dieser Arbeit die ereignisdiskrete Simulation bevorzugt wird.

Digitale Abbilder im industriellen Umfeld

Das Thema der Digitalen Abbilder im industriellen Umfeld erfährt seit einigen Jahren ein verstärktes Interesse in Wissenschaft und Industrie. Nach einem kurzen historischen Abriss zur Herkunft des Konzepts wird auf aktuelle Publikationen eingegangen, um die derzeitige Forschung zu Digitalen Abbildern zu analysieren und einzuordnen. Sodann wird die betrachtete Forschungslücke herausgearbeitet.

In **Kapitel 3** wird das Verfahren zur Bewertung der Auswirkung des Nutzens Digitaler Abbilder in der SMT-Flachbaugruppenfertigung vorgestellt. Hierbei werden die bei der MVE beleuchteten Parameter definiert und die betrachteten Faktoren bei der Bestandsführung aufgezeigt. Anschließend wird ein Kennzahlensystem eingeführt, anhand dessen Szenarien analysiert und bewertet werden. Das Kennzahlensystem beinhaltet neben gängigen Produktions- und Logistikkennzahlen zur Beschreibung der Effekte der Digitalen Abbilder ebenso Kennzahlen zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit der Digitalen Abbilder bei verschiedenen Integrationsgraden. In der Arbeit wird Wert darauf gelegt, die Effekte und Leistungsfähigkeit der Digitalen Abbilder möglichst signifikant darzustellen, was durch die Nutzung von sechs wesentlichen Kennzahlen¹⁴ erreicht wird. Abschließend wird die erwartete Entwicklung der Kennzahlen bei verschiedenen Integrationsgraden aufgezeigt. Diese Zusammenhänge werden in Kapitel 5 im Zuge der Verifikation und Validierung erneut herangezogen.

Kapitel 4 widmet sich dem Aufbau des Simulationsmodells, um die vorher beschriebenen Parameter hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die definierten Kennzahlen analysieren zu können. Das Vorgehen orientiert sich an der VDI Richtlinie 3633 Blatt 1 [VDI14]. Zunächst werden die unterschiedlichen Integrationsgrade der Digitalen Abbilder definiert und erläutert, wie diese im Simulationswerkzeug umgesetzt werden, insbesondere welche Attribute in der Simulation parametrisiert werden. Anschließend werden sechs Szenarien definiert, um die Kombinationen der MVE und Bestandsführung zu untersuchen. Eine

¹⁴ Zwei Produktionskennzahlen, zwei Logistikkennzahlen, zwei Kennzahlen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Digitalen Abbilder

Veranschaulichung der Szenarien erfolgt anhand von Prozessflüssen, Zeitstrahlen und einer übersichtlichen Darstellung der Veränderung der definierten Parameter.

Kapitel 5 widmet sich der Verifikation und Validierung des Modells sowie der industriellen Erprobung anhand realer Produktions- und Intralogistikdaten eines mittelständischen EMS-Unternehmens. Nach einer Beschreibung der analysierten Daten erfolgt eine Verifikation und Validierung des Modells. Nach dem Aufzeigen des Ist-Zustandes werden anschließend die in Kapitel 4 vorgestellten Szenarien mit realen Daten simuliert und die Auswirkung auf das definierte Kennzahlensystem ermittelt. Hierbei treten Szenarien mit bereits implementierten Automatisierungslösungen und Szenarien ohne Automatisierungslösungen auf, um den Mehrwert des Heranziehens Digitaler Abbilder isoliert und in Kombination mit Automatisierung aufzuzeigen. Abschließend werden die Ergebnisse gegenübergestellt und hinsichtlich ihres Nutzens diskutiert.

Zum Abschluss der Arbeit erfolgt in **Kapitel 6** eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten in diesem Bereich.