

Böttcher, Simon; Krone, Eric; Meussen, Bernhard; Schnauer, Markus; Rittemann, Steffen

**Working Paper**

## Die flexible Fertigungszelle als ein Cyber-Physikalisches Produktionssystem (CPPS)

Arbeitspapiere der Nordakademie, No. 2016-06

**Provided in Cooperation with:**

Nordakademie - Hochschule der Wirtschaft, Elmshorn

*Suggested Citation:* Böttcher, Simon; Krone, Eric; Meussen, Bernhard; Schnauer, Markus; Rittemann, Steffen (2016) : Die flexible Fertigungszelle als ein Cyber-Physikalisches Produktionssystem (CPPS), Arbeitspapiere der Nordakademie, No. 2016-06, Nordakademie - Hochschule der Wirtschaft, Elmshorn

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/129731>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

# ARBEITSPAPIERE DER NORDAKADEMIE

ISSN 1860-0360

Nr. 2016-06

## Die flexible Fertigungszelle als ein Cyber-Physikalisches Produktionssystem (CPPS)

Simon Böttcher, Eric Krone, Bernhard Meussen, Markus Schnauer, Steffen Rittemann

Februar 2016

Eine elektronische Version dieses Arbeitspapiers ist verfügbar unter:

[www.nordakademie.de/de/arbeitspapiere/](http://www.nordakademie.de/de/arbeitspapiere/)

Köllner Chaussee 11

25337 Elmshorn

[www.nordakademie.de](http://www.nordakademie.de)



# Die flexible Fertigungszelle als ein Cyber-Physikalisches Produktionssystem

Simon Böttcher, Eric Krone, Bernhard Meussen, Markus Schnauer, Steffen Rittemann

NORDAKADEMIE – Hochschule der Wirtschaft, Elmshorn

**Abstract:** Auf der Hannover-Messe 2011 trat die Initiative „Industrie 4.0“ an die Öffentlichkeit. Seither wird in Deutschland aktiv an der Vision Industrie 4.0 gearbeitet. Bisher gibt es hierzu nur fragmentarische Praxisbeispiele und gleichzeitig umfassende Bemühungen in der Grundlagenforschung. Dieses Arbeitspapier greift die anhaltende Diskussion zu dem Thema auf und stellt ein Beispiel für den Nutzen und die Anwendung von Industrie 4.0 vor. Ziel ist es, durch eine praxisnahe Anwendungsszenario die Kluft zwischen Anspruch und Wirklichkeit in der Diskussion um Industrie 4.0 zu überwinden helfen.

## 1. Einleitung

Die Entwicklung der industriellen Produktion zur Industrie 4.0 verspricht vielfältigen Nutzen für alle Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette. Der Weg zur Industrie 4.0 ist aus technologischer Sicht dabei eine rein evolutionäre Entwicklung [AHR2012]. Die wirkliche Revolution besteht vielmehr in den Auswirkungen auf vorhandene Geschäftsprozesse und speziell darin, vollkommen neue Geschäftsmodelle entwickeln zu können. Aus diesem Grund hat die „Plattform Industrie 4.0“ die Entwicklung von Methoden für Geschäftsmodelle als eines der zentralen Themen in ihre Umsetzungsstrategie aufgenommen [BVZ2015]. Auch aktuelle Studien zeigen, dass für eine Vielzahl der Unternehmen aus der deutschen Kernindustrie eine der größten Chancen der Digitalisierung darin besteht, neue Unternehmenskonzepte zu entwickeln [DEB2015][BMWI2015]. Dennoch wird diese strategische Perspektive insbesondere in der fertigen Industrie aktuell kaum umgesetzt. Produzierende Unternehmen sind sich der Chance, die sich durch diese Branchenveränderung ergibt zwar bewusst, nutzen die neuen Möglichkeiten jedoch vorwiegend für das operative Geschäft, zur Optimierung bestehender Prozesse und Produkte [BAU2014].

Bisher gibt es nur wenige Beispiele aus der Praxis, in denen durch die Möglichkeiten der Industrie 4.0 neu geschaffene Geschäftsmodelle umgesetzt werden [MEU2015]. Diese Arbeit liefert einen entsprechenden Ansatz. Es soll unter Berücksichtigung neuer Möglichkeiten die sich durch die Technologien der Industrie 4.0 bieten, ein tragfähiges Geschäftsmodell identifiziert, konkretisiert, methodisch geplant und anschließend in Form einer flexiblen Fertigungszelle modellhaft als Cyber-Physikalisches Produktionssystem (CPPS) realisiert werden. Dabei liegt der Schwerpunkt nicht auf der reinen Anwendung von Technologien, sondern vor allem auf der Praxisrelevanz des Geschäftsmodells und der Erreichung eines Mehrwertes durch den Einsatz der gewählten Technologien. Dabei wurde folgendes Vorgehen gewählt:

1. Mögliche Geschäftsmodelle identifizieren, priorisieren und ein geeignetes Geschäftsmodell auswählen. Möglichkeiten der Kombinatorik von individuellen und standardisierten Teilen innerhalb einer flexiblen Fertigungszelle unter Verwendung von kollaborierenden Robotern berücksichtigen.
2. Planung der Realisierung des ausgewählten Geschäftsmodells. Kritische Bewertung der Vorstudie hinsichtlich der Eignung für das gewählte Geschäftsmodell.
3. Erstellung einer Visualisierung als Nachweis der Funktionalität des CPPS.

## 2. Definition Industrie 4.0 und Cyber-Physical System

Der Arbeitskreis Industrie 4.0 hat 2013 folgende Definition gegeben [ACT2013]: „Im Zusammenspiel mit der fortschreitenden Miniaturisierung und dem Siegeszug des Internets führt dieser Trend zur Allgegenwärtigkeit der rechnergestützten Informationsverarbeitung (Ubiquitous Computing). Autonome, leistungsfähige Kleinstcomputer (Eingebettete Systeme/Embedded Systems) werden zunehmend drahtlos untereinander und mit dem Internet vernetzt: Die physikalische Welt und die virtuelle Welt (der Cyber-Space) verschmelzen zu sogenannten Cyber-Physical Systems (CPS). Mit der Einführung des neuen Internetprotokolls IPv6 im Jahr 2012 stehen ausreichend Adressen für die flächendeckende, unmittelbare Vernetzung von intelligenten Gegenständen per Internet zur Verfügung. Somit wird erstmals eine Vernetzung von Ressourcen, Informationen, Objekten und Menschen möglich, die auch die Industrie betrifft: Das Internet der Dinge und Dienste. Diese technologische Evolution lässt sich bezogen auf die Produktion als vierte Stufe des Industrialisierungsprozesses bewerten: Industrie 4.0.“

CPS können sich zu übergeordneten Systemen, z.B. sog. Cyber-Physical Production Systems (CPPS), vernetzen und neue Dienste und Funktionen ausführen. So kann aus der Kombination von CPS ein Smart Home, eine Smart City, ein Smart Grid oder eine Smart Factory werden [ACT2013].

Die Anwendung der CPS in der Industrie 4.0 führt zur durchgängigen Digitalisierung des Produktlebenszyklus. In Kombination mit der Fähigkeit zur Vernetzung können neue Geschäftsmodelle entstehen. Diese werden durch Industrie-4.0-Wertschöpfungsketten und Wertschöpfungsnetzwerke beschrieben [VDI2014].

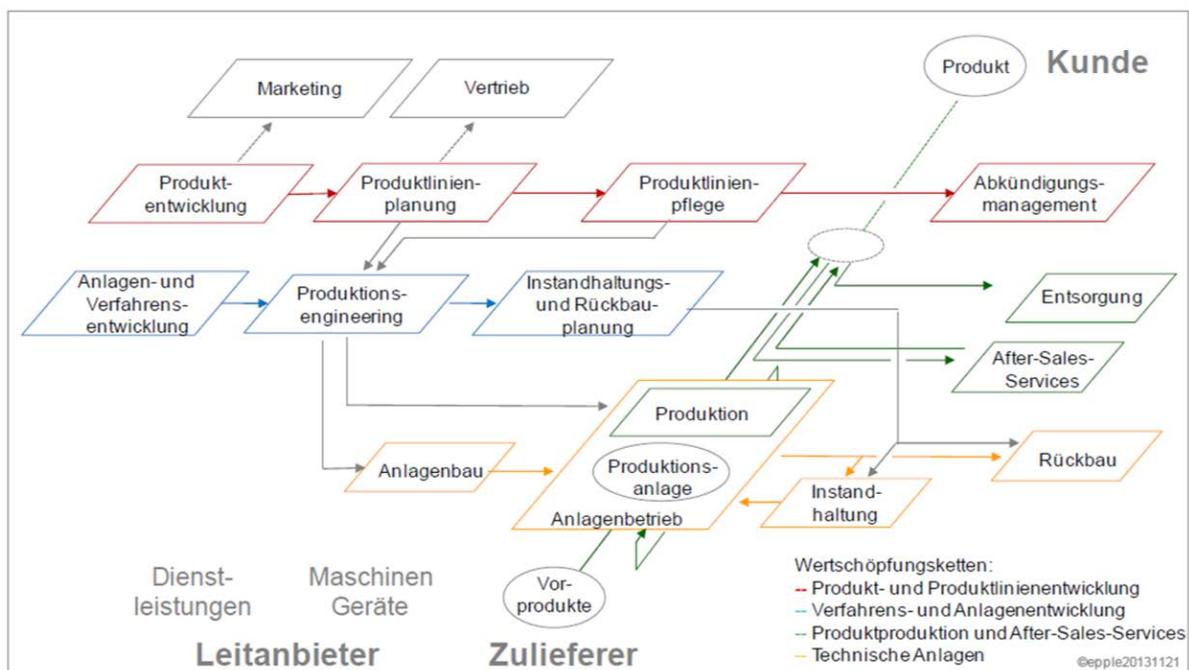


Abbildung 1: Wertschöpfungsnetzwerke Industrie 4.0 [VDI2014]

Erwartet werden

- neue Geschäftsmodelle,
- Produktivitätsverbesserungen und
- kundenindividuelle Dienstleistungen und Produkte.

Dabei werden Umwälzungen erwartet, die denen nach der Einführung des Internets nicht nachstehen [ACT2013][BAU2014][BMW2015].

### 3. Konzeption von Geschäftsmodellen

David Teece beschreibt Geschäftsmodelle so [TEE2010]: „The essence of a business model is defining the manner by which the enterprise delivers value to customers, entices customers to pay for value, and converts those payments to profit.“ Eine Möglichkeit der Geschäftsmodellentwicklung sind systematische Ansätze, z.B.:

- Design Thinking (z.B. [BRE2011]),
- Business Modell Canvas [OST2011] oder
- Geschäftsmodell-Muster [GAS2013].

Ausgangspunkt ist die Geschäftsidee, die effizient auch durch Kreativitätstechniken herausgearbeitet werden kann [HER2005]. Für die erste Sammlung von Geschäftsideen hat wurden Webrecherchen und die Kreativitätstechniken des Brainstormings und Brainwritings angewendet und in Mindmaps dokumentiert. Es wurden Geschäftsideen gesucht, die für die Anwendung von CPS prädestiniert scheinen oder die Anwendung von CPS zwingend voraussetzen würden.

#### 3.1. Ansatz B2B

Innerhalb des B2B-Zweiges wurden besonders viele Geschäftsideen in dem Bereich Ersatzteilmontage gefunden. Auch gibt es Verbindungen zu anderen Ideenansätzen, wie etwa der Ersatzteilversorgung im B2C-Bereich oder generell der Individualisierung von Werkzeugen.

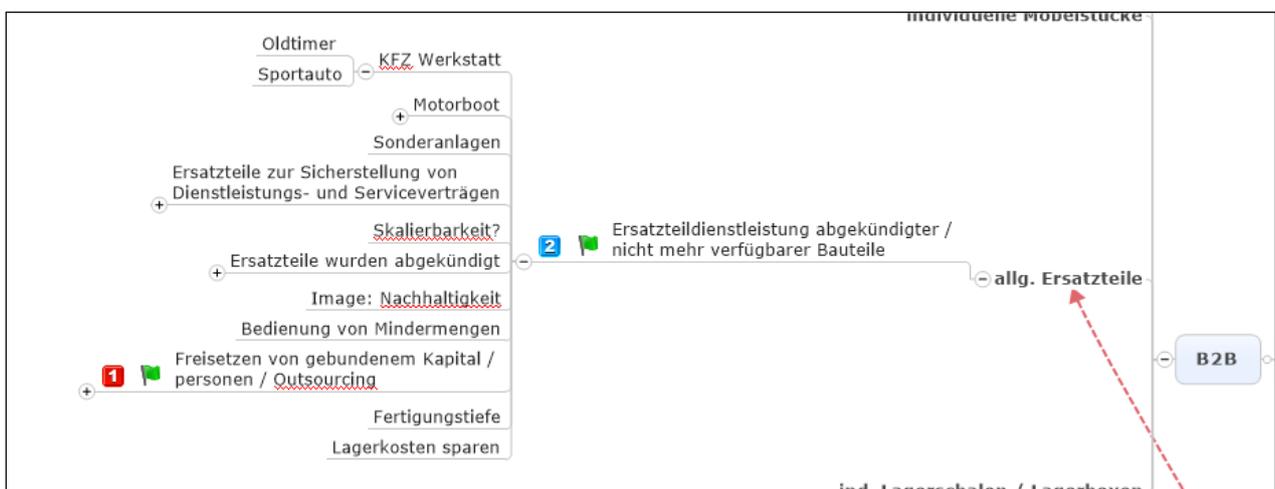


Abbildung 4: Ausschnitt Mindmap „Geschäftsideen B2B“

### 3.2. Ansatz B2C

Als weiterer Ansatz wurden Geschäftsideen im Business-to-Consumer-Bereich untersucht.

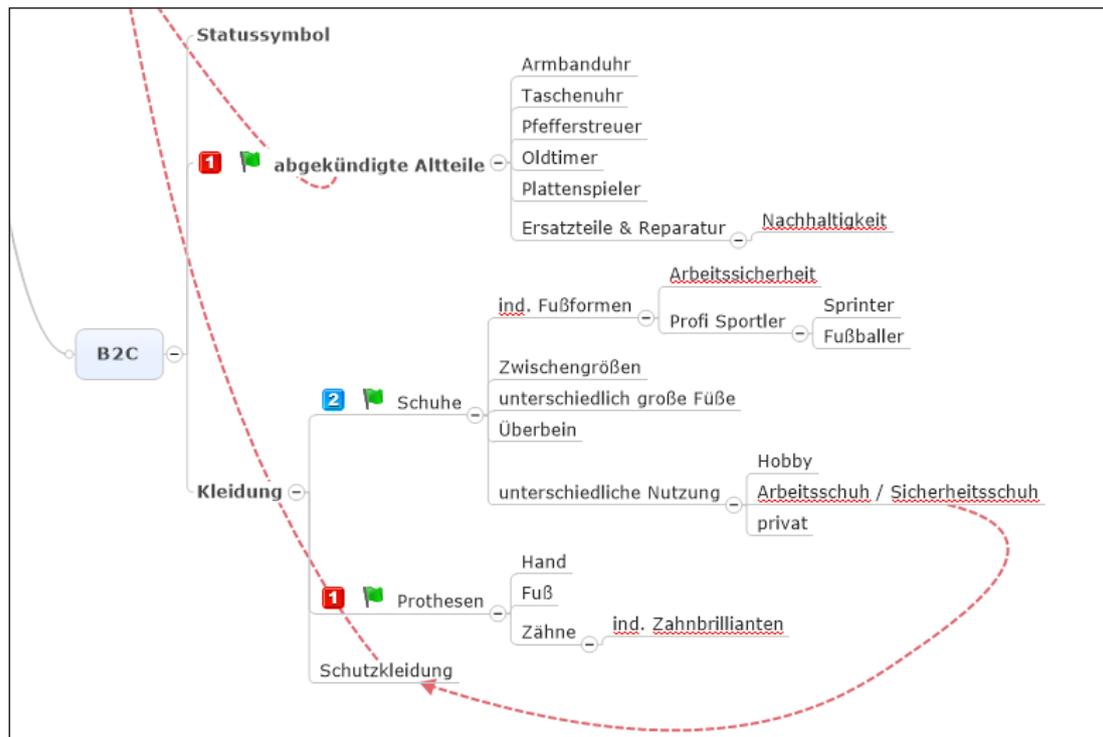


Abbildung 5: Ausschnitt Mindmap „Geschäftsideen B2C“

### 3.3. Ansatz Megatrends

Um bei der Entwicklung eines Geschäftsmodells aus einer anderen Perspektive zu starten, wurde eine weitere eigenständige Mindmap mit dem Ausgangspunkt „Megatrends“ erstellt. Megatrends gelten in der Trendforschung als besonders tiefgreifende und nachhaltige Veränderungen der Gesellschaft, Wirtschaft oder Technologie. Da der gesamte Industrie 4.0-Kontext des Projektes und besonders die Technologie der additiven Fertigung völlig neue Verfahren mit bisher nicht ausgeschöpftem Potential ermöglichen, bietet sich eine Suche nach Geschäftsmodellen aus dem Blickwinkel zukünftiger Erfordernisse an. Ein ideales Geschäftsmodell für das Projekt wäre die Lösung eines Problems, welches aus einem Zukunftstrend entstehen wird und mit bisheriger Technologie nicht oder nicht ausreichend wirtschaftlich gelöst werden kann. Großes Potential hat sich in dem Megatrend „Individualisierung“ ergeben.

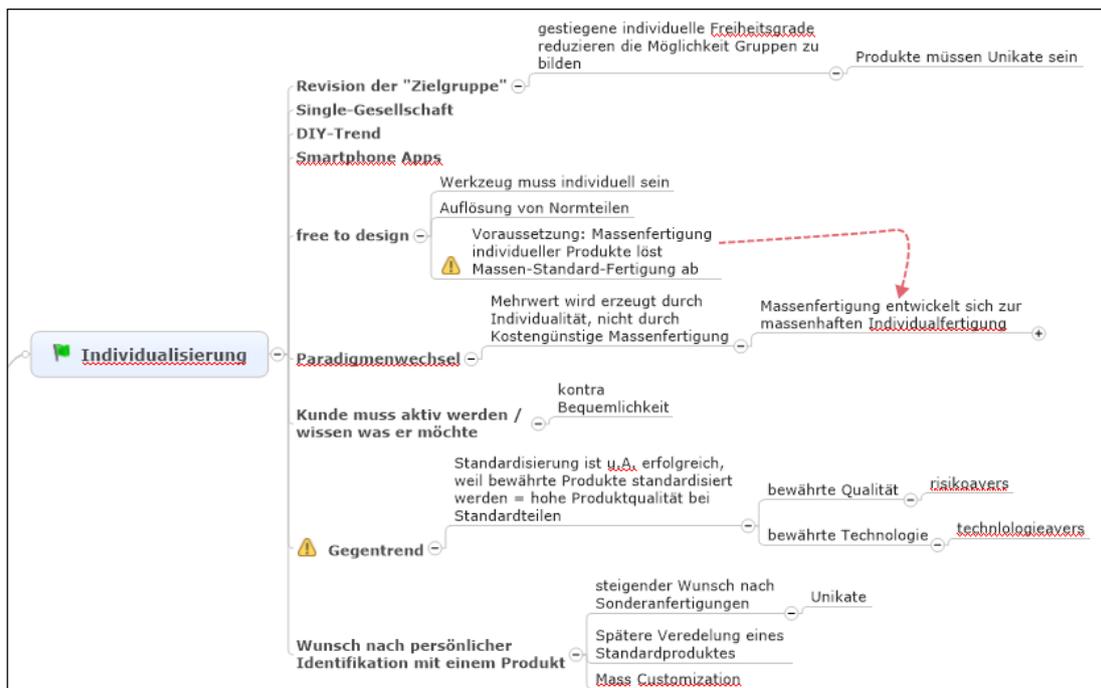


Abbildung 6: Ausschnitt Mindmap „Megatrend Individualisierung“

Langfristig könnte durch diesen Megatrend ein Paradigmenwechsel stattfinden, der bewirkt, dass ein Mehrwert eines Produktes nicht mehr durch seine kostengünstige Massenfertigung entsteht, sondern durch die Möglichkeit seiner Individualisierung [BAU2014]. Das zentrale Problem bisheriger Fertigungsmethoden wäre in diesem Fall, dass nicht auf individuelle Erfordernisse eingegangen werden kann, ohne hohe Kosten in der Herstellung zu erzeugen. Additive Fertigungsverfahren in Verbindung mit den Möglichkeiten von Industrie 4.0 könnte dafür eine Lösung liefern, indem die kostengünstige, massenhafte Fertigung individueller Produkte ermöglicht wird.

Aus der Verbindung des Megatrends „Individualisierung“ mit dem Ideenansatz „Mensch – Wohnung“ sind diverse Ideen für Produkte entstanden.

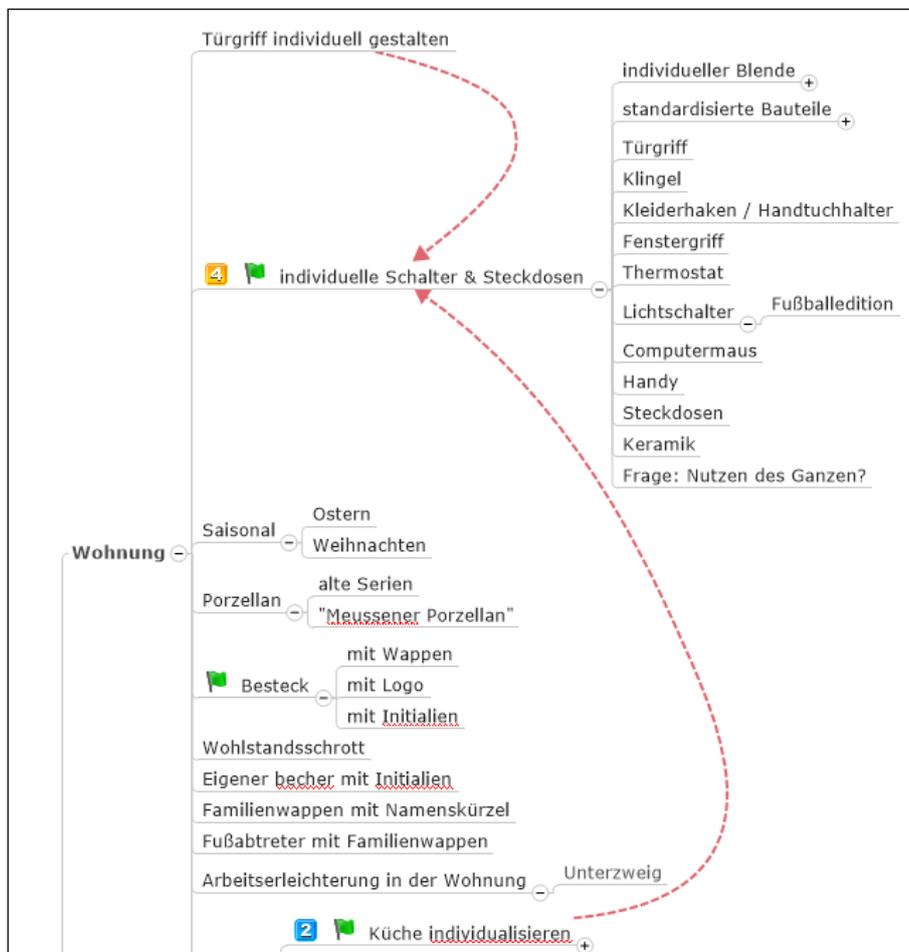


Abbildung 7: Ausschnitt Mindmap „Individualisierung, private Wohnung“

### 3.4. Bewertung und Auswahl der Idee

Die Bewertung der identifizierten Produktideen findet durch ein zweistufiges Verfahren statt. Zuerst verteilen Bewertenden vier Punkte. Danach werden die Ideen sowie die erzielten Stimmen nach Häufigkeit sortiert. Anschließend werden die bereits identifizierten Querverbindungen genutzt und Cluster gebildet.

Idee	Anzahl der Stimmen	Nummer	Clustering	Überbegriff	Stimmenverteilung
individuelle Schalter & Steckdosen	4	1	individuelle Schalter & Steckdosen	Bedienelemente	6
Küche individualisieren	2		Küche individualisieren		
Ersatzteildienstleistung abgekündigter / nicht mehr verfügbarer Bauteile	2	2	Ersatzteildienstleistung abgekündigter / nicht mehr verfügbarer Bauteile	Ersatzteile	4
Schutzkleidung	2		abgekündigte Altteile		
Schuhe	2		Freisetzen von gebundenem Kapital / personen / Outsourcing		
Standardwerkzeug mit ind. Handform	1	3	Schuhe	Schutzausrüstung	4
abgekündigte Altteile	1		Schutzkleidung		
Freisetzen von gebundenem Kapital / personen / Outsourcing	1	4	Standardwerkzeug mit ind. Handform	keine weitere Betrachtung	
Prothesen	1	5	Prothesen		

Abbildung 8: Bewertung der Geschäftsideen

Die drei größten Cluster Bedienelemente, Ersatzteile und Schutzrüstung wurden in einer Analysephase weiter betrachtet. Das größte Potential besitzt die Produktidee „Individuelle Schalter & Steckdosen“, die im Folgenden weiter als Geschäftsmodell „Bedienelemente“ betrachtet wird.

#### 4. Analyse des Geschäftsmodells „Bedienelemente“

Die Produktidee "Bedienelemente" umfasst zum einen Schalter- und Steckdosen-Abdeckungen/Rahmen, aber auch Haken, Griffe, Blenden und Gehäuse wie bspw. bei Rauchmeldern in privaten Haushalten. Diese sollen in ihrer Form/Anordnung, Farbe und ihrem Material kundenspezifisch gefertigt werden. Dabei erhält der Kunde große Individualisierungsmöglichkeiten, um z.B. die Farbe seiner Lichtschalter und Steckdosen mit der Wandfarbe zu kombinieren.

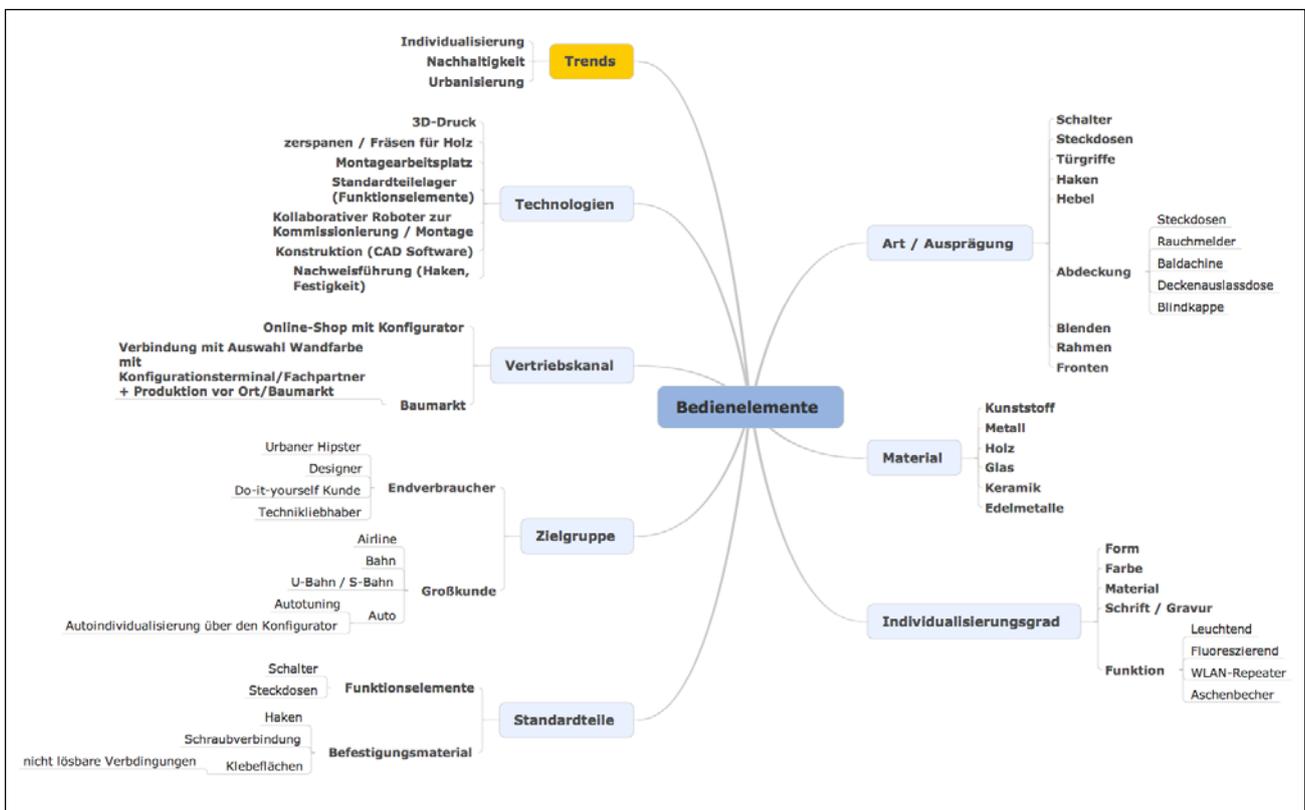


Abbildung 9: Mindmap Geschäftsmodell „Bedienelemente“

##### 4.1. Geschäftsmodell

Das Geschäftsmodell orientiert sich an Kunden, die ihren privaten Wohnraum individuell gestalten wollen. Daher ist eine Kooperation mit einer Baumarkt-Kette sinnvoll, um die Kunden, die z.B. Wandfarbe kaufen, direkt für farblich abgestimmte Schalter- und Steckdosen zu gewinnen. Die Fertigung könnte in einer flexiblen Fertigungszelle direkt vor Ort erfolgen und dem Kunden das Produkt nach kurzer Wartezeit direkt zur Mitnahme bereitstellen. Dies verringert die Bestände vor Ort bei gleichzeitiger Erhöhung der Verfügbarkeit an Teilen.

#### **4.2. Markt**

Der Zielmarkt umfasst zunächst Privatpersonen, die ihren Wohnraum individuell gestalten wollen. Da die Individualisierung von Produkten ein Megatrend ist, ist von hohen Wachstumsraten in diesem Markt auszugehen. Die flexible Erweiterung der Produktpalette ermöglicht zusätzliches Wachstumspotenzial.

#### **4.3. Investitionsbedarf**

Der Investitionsumfang für eine flexible Fertigungszelle zur Realisierung des Geschäftsmodells ist als eher gering einzuschätzen. Bei einer Umsetzung an vielen Standorten ist jedoch ein erheblicher Investitionsumfang erforderlich.

#### **4.4. Entwicklungspotenzial**

Das Geschäftsmodell weist ein erhebliches Entwicklungspotenzial auf, da laufend individualisierbare Produkte aus dem Bereich Haustechnik/ Wohnraumgestaltung, die durch die vorhandene Anlage produzierbar sind, in die flexible Fertigung integriert werden können.

#### **4.5. Geschäftsprozess**

Das Geschäftsmodell „Bedienelemente“ sieht vor, eine flexible Fertigungszelle innerhalb eines Baumarktes zu platzieren und nach Kundenanforderung unterschiedliche Bedienelemente zu drucken und nach Fertigstellung direkt auszugeben.

GM 1: Bedienelemente  
 Prozessablauf aus Kundensicht

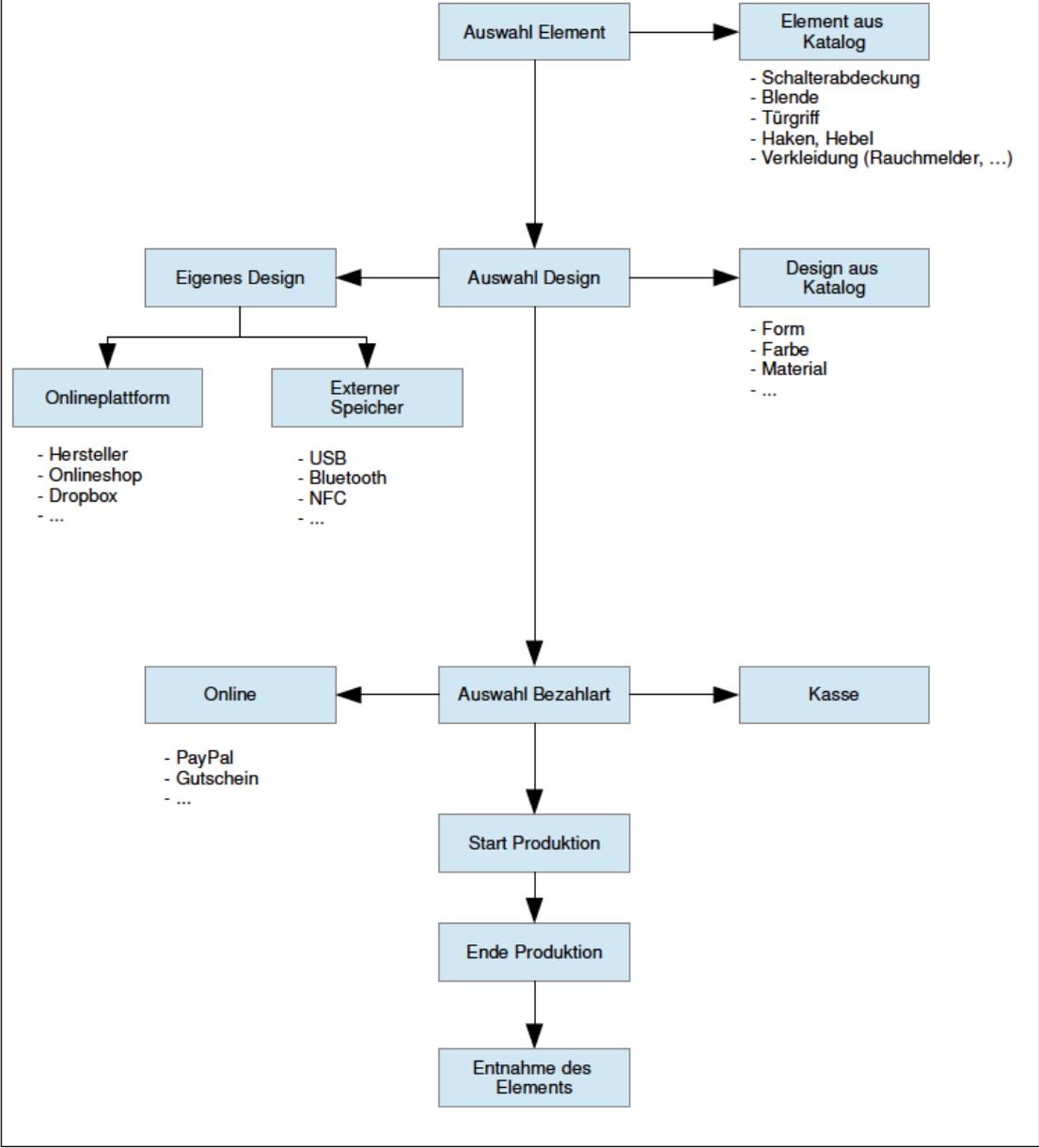


Abbildung 10: Geschäftsprozess „Bedienelemente“ aus Kundensicht

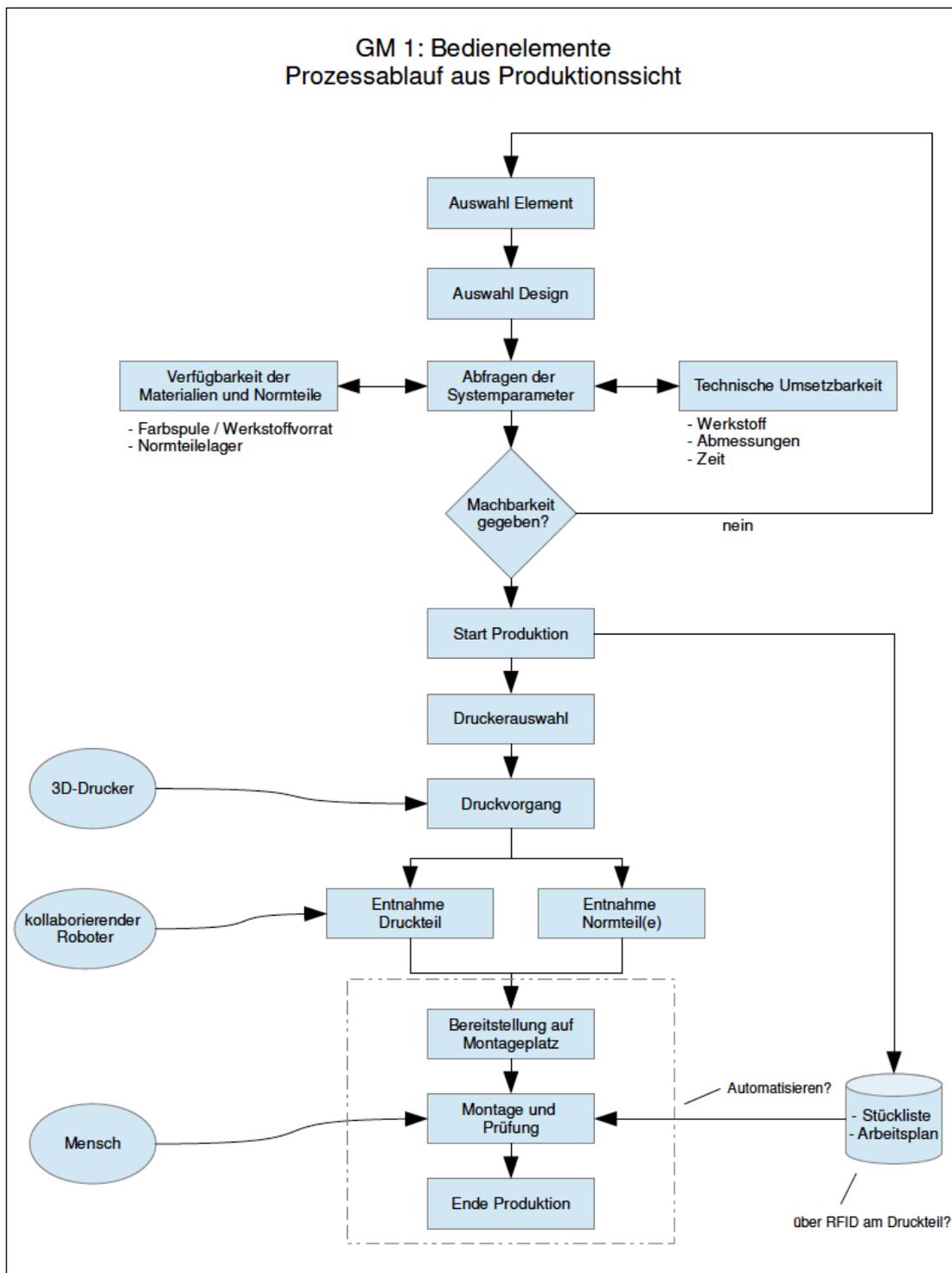


Abbildung 11: Geschäftsprozess „Bedienelemente“ aus Produktionssicht

Um die ausgewählten Bedienelemente gemäß der modellierten Geschäftsprozesse herstellen zu können, wurde in einer Machbarkeitsanalyse eine Auswahl geeigneter Materialien für die individuellen Produktbestandteile, einsetzbare Technologien und geeignete Norm- oder Standardteile getroffen.

Kriterien	Bedienelemente
<b>Material</b>	Kunststoff
	Metall
	Holz
	Glas
	Keramik
<b>Technologien</b>	3D-Druck
	Standardteilelager (Funktionselemente)
	Montagearbeitsplatz
	kollaborativer Roboter zur Kommissionierung/Montage
	Konstruieren (CAD-Software)
	Nachweisführung (Haken, Festigkeit)
	Fräsen/Zerspanen für Holz
<b>Standardteile</b>	Funktionselemente (z.B. bei Schalter & Steckdosen)
	Befestigungsmaterial (Haken, Hebel)
	Klebeflächen (nicht lösbare Verbindungen)

Abbildung 12: Eingrenzung für Geschäftsprozess „Bedienelemente“

Als Technologieschwerpunkt sind die additiven Fertigungsverfahren zu identifizieren, da durch diese die Material- und Produktvielfalt in erheblichem Maße bestimmt wird (siehe auch [BEY2013]). Diese werden unter der Berücksichtigung der Faktoren Eigenschaften, Verfahren, Material und Nachbearbeitung verglichen. Ausschlaggebend für die Auswahl des additiven Fertigungsverfahrens ist insbesondere die Notwendigkeit von Nachbearbeitung bei einigen Verfahren. Durch recht aufwendige Nachbearbeitungsschritte bei Teilen, die mit FDM oder SLM gefertigt werden, fallen diese beiden Verfahren aus der weiteren Betrachtung heraus. Außerdem sind bei den Verfahren Polyjet und SLS das Fertigen von Endbenutzertauglichen Teilen möglich, sodass die Nachbearbeitung sehr kurz ausfällt. Mithilfe des Polyjet-Verfahrens können zusätzlich mehrfarbige Kunststoffteile hergestellt werden und das SLS-Verfahren eignet sich besonders für verschiedene Materialien. SLS- und Polyjet-Verfahren sind für alle drei Geschäftsmodelle geeignet und decken damit komplett die benötigten Materialien ab.

Verfahren	Fused Deposition Modeling (FDM)	Polyjet (PJ)	Selective Laser Sintering (SLS)	Selective Laser Melting (SLM)
<b>Eigen-schaften</b>	günstig, gut für Prototypen geeignet, bereits im richtigen Material möglich. geringe Genauigkeit	thermische und mechanische Eigenschaften nicht so gut, dafür sieht es dem finalen Teil schon recht ähnlich	thermische und mechanische Eigenschaften sind gut, ideal für Endbenutzerteile	Muss über Stützkonstruktion realisiert werden, sodass sich das Teil nicht verzieht.
<b>Verfahren</b>	Harz	UV Licht mit Kunststoff	selektives Lasersintern	Selektives Laserschmelzen
<b>Material</b>	diverse Kunststoffe	Kunststoff	mechanisch gut, aber Oberflächen sind rau	Oberflächen sind porös
<b>Nachbearbeitung</b>	2% Natronlaugebad	Nachbearbeitung erst mit Wasser	ggf, Oberfläche schleifen	Nachglühen

Abbildung 12: Vergleich relevanter Verfahren der additiven Fertigung

## 5. Realisierung des ausgewählten Geschäftsmodells

Das ausgewählte Produkt für die Umsetzung des Geschäftsansatzes „Bedienelemente“ sind Rahmen und Abdeckungen für Schalter und Steckdosen. Den Kunden wird damit, im Vergleich zu den vorhandenen Varianten der etablierten Anbieter, eine vollständige Individualisierung geboten. Diese umfasst zum einen die freie Auswahl von Farben und zum anderen eine freie Gestaltung der Form, die nur durch die standardisierte Schnittstelle zum eigentlichen Funktionselement eingeschränkt ist. Darüber hinaus erhält der Kunde die Möglichkeit zwischen Kunststoffen, Metallen und keramischen Werkstoffen zu wählen. Im Folgenden sind zwei Individualisierungsbeispiele von Lichtschaltern gezeigt. Abbildung 13 zeigt eine Lichtschalterabdeckung, angelehnt an die Gebäudeform (Dockland in Hamburg); Abbildung 14 die Umsetzung des Grundrisses zur Funktionsdarstellung des Schalters.

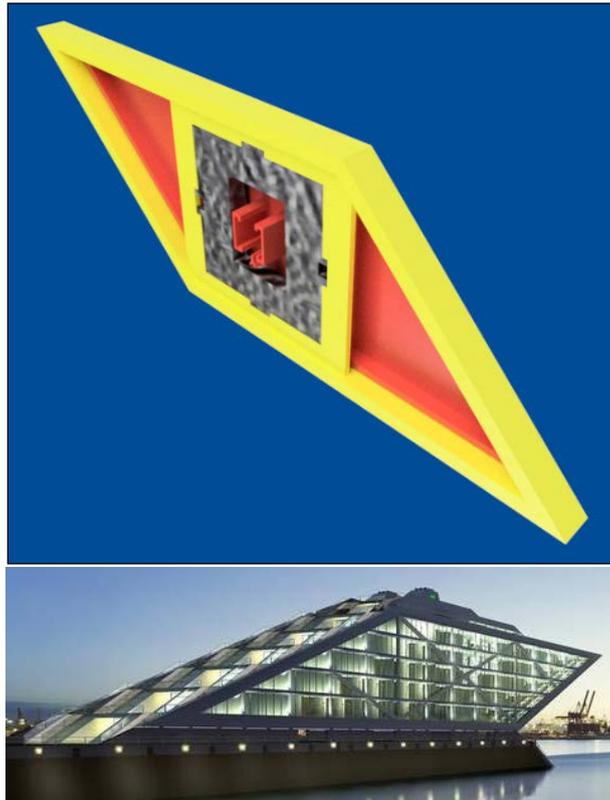


Abbildung 13: Beispiel für die individuelle Gestaltung von Bedienelementen

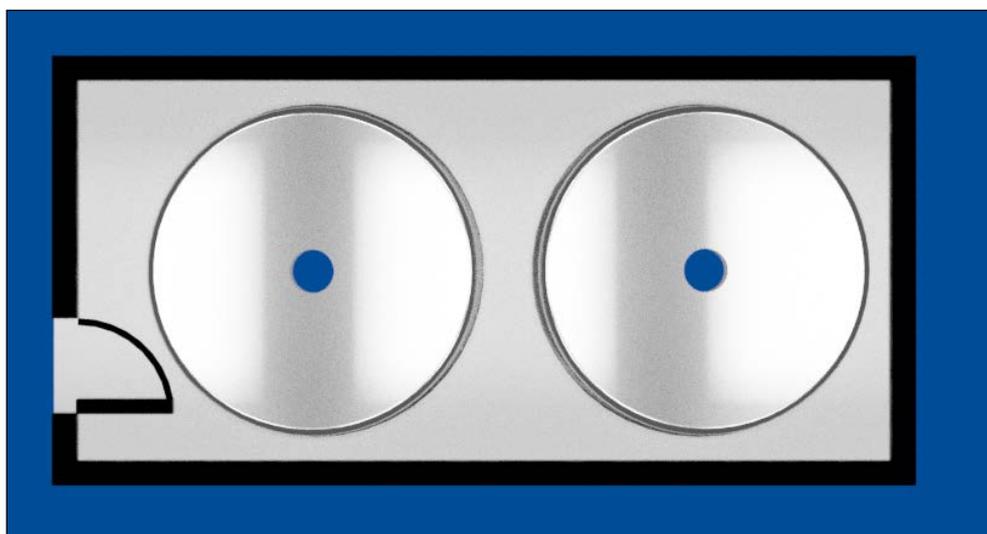


Abbildung 13: Schalterrahmen mit Grundriss des Raums

Der hier als wichtigster Markt identifizierte „Do-It-Yourself“-Markt umfasst Privatpersonen, die für eine individuelle Gestaltung ihres Wohnraumes im Baumarkt eine große Auswahl an Produkten erwarten und diese in der Regel in Eigenleistung verbauen. Mit Bezug auf das Produkt der Rahmen und Abdeckungen für Schalter und Steckdosen werden somit in erster Linie Kunden angesprochen, die ihr Eigenheim bauen, sanieren oder renovieren und dabei besonderen Wert auf eine individuelle Gestaltung legen.

Priorität hat für viele Kunden die individuelle Gestaltung der Form und der Farbe des Produktes. So könnte ein Kunde zum Beispiel die Schalter und Steckdosen passend zu der ausgewählten Wandfarbe bestellen und sie in der Form an seine Wünsche anpassen. Darüber hinaus könnte auch eine freie Auswahl aus verschiedenen Materialkombinationen als Mehrwert angeboten werden.

Bei der Ausgestaltung der Absatzstrategie ist in erster Linie zu beachten, dass die Kunden für das Produkt nicht sensibilisiert sind, da es sich um einen neuartigen Ansatz handelt. Aus diesem Grund ist eine Kooperation mit einem Baumarkt in einem großen Einzugsgebiet sinnvoll. Hier können die Kunden, die zu einem Großteil genau dem angesprochenen Kundensegment angehören, vor Ort angesprochen werden. Die Produkte können dabei vor Ort gestaltet und bestellt werden. Nach der abgeschlossenen Produktion können die Produkte abgeholt oder versandt werden. In einer späteren ersten Ausbaustufe könnte die Wiederbeschaffung über ein Online-Kundenprofil realisiert werden.

Aus dieser Ausgestaltung des Geschäftsmodells ergibt sich das Risiko der Abhängigkeit von der Baumarktkette. Auch das geringe Expansionspotential innerhalb eines Baumarkts ist als kritisch zu bewerten. Die Nähe zum Baumarkt bietet jedoch auch viele Synergieeffekte. So können die Standardteile (Funktionselemente, Schrauben, Hohlwanddosen, etc.) aus dem Bestand des Baumarkts übernommen werden, sodass für diese Teile keine zusätzliche Kapitalbindung erforderlich ist. Dem Baumarkt bietet dies den Vorteil, dass Kunden motiviert sind, einen sehr hohen Anteil des Materials aus dem Bestand des Baumarktes zu kaufen (alles aus einer Hand). Darüber hinaus bietet sich dem Baumarkt ein Wettbewerbsvorteil durch die Realisierung der individuellen Bedienelemente. Der Baumarkt hat somit auch ein hohes Eigeninteresse das neue Produkt zu bewerben, was die Realisierung dieser Geschäftsidee zusätzlich um das Marketingbudget erleichtert.

In einer ausgewogenen Kooperation mit einer Baumarktkette könnte sich somit eine „Win-Win-Situation“ ergeben. Das Geschäftsmodell könnte dabei in einer mietfreien Fläche innerhalb des Baumarktes realisiert werden und der Baumarkt würde von steigenden Umsätzen und einer hohen Kundenbindung profitieren.

Nach der erfolgreichen Einführung könnte eine Verbreitung der neuen Produktidee zusätzlich über Internetplattformen (z.B. Youtube) oder Fernseh-Magazine (z.B. Galileo, Welt der Wunder, etc.) erfolgen, die ebenfalls für ein positives Image und eine hohe öffentliche Wahrnehmung des kooperierenden Baumarktes führen würde.

Ein durchschnittlicher Kundenauftrag für den Bau oder die Renovierung eines Eigenheims würde in etwa 10 bis 20 Lichtschalter und 25 bis 50 Steckdosen umfassen. Somit ist eine Auslastung einer Fertigungszelle bereits mit einer relativ geringen Kundenanzahl möglich. Hierbei ist darauf zu achten, dass ausreichend Ausbau-Reserven geplant und mit geringem Aufwand realisierbar sind.

Das Entwicklungspotenzial ergibt sich zunächst aus der Ausweitung auf weitere Baumärkte in anderen Städten. Hierbei sollte berücksichtigt werden, dass die einzelnen Standorte über eine ausreichende Distanz zueinander verfügen, um einen direkten Wettbewerb zu vermeiden. Die verschiedenen Standorte würden hierbei ein horizontales Wertschöpfungsnetzwerk (Abbildung 14) bilden. Dabei könnte das Kapazitätsmanagement die vorhandenen Aufträge nicht nur innerhalb einer Anlage verwalten, sondern ggfs. über das gesamte Netzwerk steuern. So könnten freie Kapazitäten an einzelnen Standorten ideal genutzt werden. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht das Prinzip eines horizontalen Wertschöpfungsnetzwerks. Die Betriebe 1, 2 und 3 repräsentieren in diesem Fall verschiedene Standorte in Baumärkten. Der

Kapazitätsausgleich erfolgt über ein digital vernetztes Auftragsmanagement. Der Versand der Ware kann über herkömmliche Paketdienste realisiert werden.

In einem weiteren Schritt könnte ein Online-Shop eingerichtet werden, der es Bestandskunden ermöglicht seine vergangenen Aufträge abzurufen und zusätzlich benötigte Teile nachzubestellen. In einem weiteren Schritt würde die Ergänzung eines Online-Konfigurators auch eine vollständige Online-Auftragsabwicklung ermöglichen. Dies würde nach einer erfolgreichen Implementierung einen Kundenkreis aufbauen, der unabhängig vom Zugang zu einem der Standorte die Produkte konfiguriert und bestellt. Insbesondere für die Produktion für diese Aufträge wäre damit auch der Aufbau weiterer Produktionskapazität, die unabhängig von der kooperierenden Baumarktkette in einer kostengünstigen Region aufgebaut werden könnte, sinnvoll.

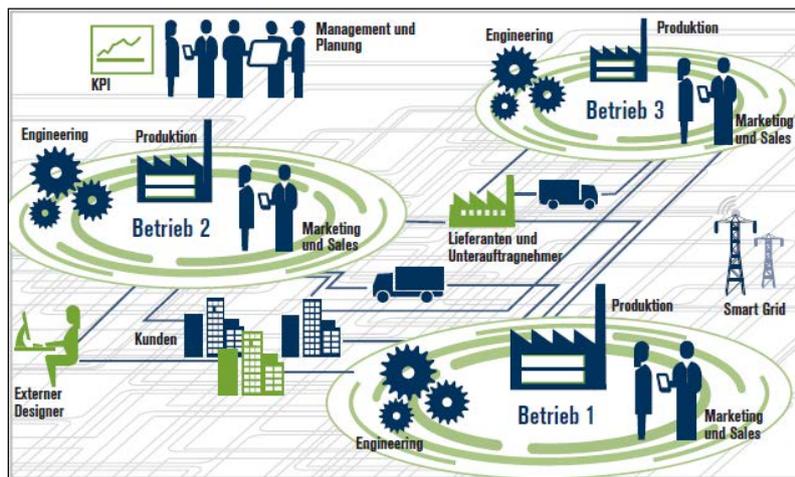


Abbildung 14: Horizontales Wertschöpfungsnetzwerk [ACT2013]

Darüber hinaus könnten im Zeitverlauf weitere Produkte in das Portfolio aufgenommen werden. Das Umfeld des Baumarktes bietet ein hohes Potenzial, da weitere Produkte aus dem Sortiment für den Kunden individuell angeboten werden könnten.

Der Investitionsumfang enthält in erster Linie die Produktionsanlage. Durch die Kooperation mit einer Baumarktkette sind die weiteren Kosten für Material, Marketing, Verwaltung und Vertrieb als gering anzusehen.

### 5.1. Bestellprozess

Der Bestellprozess aus Sicht des Kunden läuft im Wesentlichen wie in Kapitel 4.5 beschrieben ab. Einige Details müssen jedoch ergänzt werden. Die Auswahl der Elemente und des Designs aus einem Katalog erfordert, dass die entsprechende Datenbank beliebig erweitert werden kann. Die Datenbank muss auf das jeweilige Sortiment des Baumarktes angepasst werden und ist idealerweise über das Internet mit anderen Baumärkten vernetzt. Dadurch haben alle Standorte unabhängigen Zugriff auf umfassende Informationen wie Designs und Fertigungsdaten.

Für die manuelle Eingabe eines Designs müssen bestimmte Standards wie beispielsweise das Datenformat eingehalten werden. Auch bauliche Restriktionen wie Größe, Material und Geometrie sind vorhanden und müssen beachtet werden. Deshalb muss für individuelle Designs ein Konstruktionsleitfaden erstellt werden, in dem alle notwendigen Vorgaben aufgeführt sind.

Der Bestellprozess kann sowohl vor Ort im Baumarkt durchgeführt werden, als auch online über eine entsprechende Website. Der Ablauf des Bestellprozesses ist in beiden Fällen identisch, jedoch entfällt bei der Onlinebestellung die Möglichkeit der persönlichen Beratung. Nach dem Start des Produktionsauftrages wird dem Kunden die voraussichtliche Bearbeitungsdauer mitgeteilt. Bei Fertigstellung des Auftrages bekommt

der Kunde eine entsprechende Information per E-Mail oder SMS. Die Bestellung wird dann entweder in den Versand gegeben oder der Kunde kann sie in der Entnahmestation abholen.

## 5.2. Fertigungsprozess

Zum Fertigungsprozess gehören sowohl automatisierte Abläufe als auch ein menschlicher Montagearbeitsplatz. Der Druck eines oder mehrerer Teile, die Kommissionierung von Normteilen und die Bereitstellung zur Montage laufen vollständig automatisiert ab und benötigen keine menschlichen Eingriffe. Diese Schritte können daher unabhängig von Öffnungs- bzw. Arbeitszeiten ablaufen, beispielsweise über Nacht, um einen Vorlauf an Aufträgen zur Montage zu schaffen. Es ist somit möglich, Stillstände aufgrund von Materialmangel auf dem Montagearbeitsplatz zu vermeiden und eine durchgehende Auslastung zu erreichen.

Die Montage erfolgt je nach Produkt vollständig manuell durch den Menschen oder teilautomatisiert mit der Unterstützung durch einen kollaborierenden Roboter. Denkbar ist beispielsweise das Anreichen und Halten schwerer Teile oder Geräte durch den Roboter. In weiteren Ausbaustufen kann der kollaborierende Roboter weitere Aufgaben wie z.B. das mechanische Bearbeiten von Teilen (Entgraten, Überschleifen, etc.), Lackieren, Verschrauben oder die Vormontage von Baugruppen selbständig übernehmen. Hierfür sind ggf. weitere Werkzeuge und Schnittstellen zu installieren. Für die haptische und visuelle Kontrolle der Teile während und nach der Montage, insbesondere in Bezug auf die Qualitätskontrolle, bleibt jedoch die Anwesenheit eines Menschen auch weiterhin unerlässlich.

Die Verpackung der Produkte und die Übergabe an den Versand bzw. die Ausgabestation erfolgen ebenfalls voll automatisiert per kollaborierendem Roboter.

## 5.3. Technische Ausrüstung des CPPS

Damit geeignete technische Systeme für das Geschäftsmodell ausgewählt werden können, müssen Anforderungen an diese formuliert werden. Diese lassen sich einerseits aus den Produktdaten ableiten. Die nachfolgende Tabelle beschreibt die technischen Daten der vorerst festgelegten Produkte aus dem individuellen Produktportfolio.

	Abmessungen			max. Volumen (ccm)	Materialvolumen (ccm)	Gewicht (g)	Material	Farbe	Detaillierungsgrad (mm)
	Länge (mm)	Breite (mm)	Höhe (mm)						
Docklanddesign - Rahmen	230	78	11	197,34	31,0	33	ABS	einfarbig, grau, silber	0,1
Docklanddesign - Schalter	198	66,5	8,25	108,83	36,0	38	ABS	einfarbig, grau, silber	0,01
Original Docklanddesign - Rahmen	420,5	78	11	360,79	49,2	52	ABS	einfarbig, grau, silber	0,1
Original Docklanddesign - Schalter	363,7	66,5	8,25	199,53	57,6	61	ABS	einfarbig, grau, silber	0,01
Raumdesign - Rahmen	180	90	12	194,40	41,4	44	ABS	zwei- bzw. mehrfarbig, Wandfarbe (weiß), Raumbegrenzung kontrastreich (schwarz)	0,1
Raumdesign - Schalter	68	68	8	36,99	15,3	16	ABS	auffällig, Leuchtfarbe (gelb)	0,01
Steckdoseneinsatz	67	67	26,5	118,96	15,9	35	Glas	Farbe durch Material vorgegeben, farbiges Glas?	0,01
Achteckiger Steckdosenrahmen	92	92	11	93,10	15,0	120	Edelstahl	Farbe durch Material vorgegeben, Schutzlack?	0,1
Standardteil - Wippe1 (groß)	60	60	24	86,40	n.r.	10	n.r.	n.r.	n.r.
Standardteil - Wippe2 (klein)	53	53	16	44,94	n.r.	7	n.r.	n.r.	n.r.
Standardteil - Steckdoseneinbau	70	70	40	196,00	n.r.	52	n.r.	n.r.	n.r.
Standardteil - Schaltereinbau	70	70	40	196,00	n.r.	55	n.r.	n.r.	n.r.
Standardteil - Tastereinbau mit Licht	70	70	40	196,00	n.r.	58	n.r.	n.r.	n.r.

n.r. = nicht relevant

Abbildung 15: Technische Daten relevanter Produkte

Zu den relevanten technischen Daten gehören u.a. die Abmessungen der Einzelteile, das Gewicht, das Material und der Detaillierungsgrad. Aus diesen Kennzahlen lassen sich Anforderungen für die technische Ausrüstung in den nächsten Unterkapiteln formulieren. Im Anschluss daran werden verschiedene Systeme auf Grundlage dieser Anforderungen miteinander verglichen und geeignete Systeme ausgewählt.

Die Anforderungsliste an die additiven Fertigungssysteme umfasst:

- Additives Fertigungsverfahren: SLS oder Polyjet
- Detaillierungsgrad von mindestens 0,01 mm
- Minimaler Bauraum (LxBxH): 250 mm x 250 mm x 50 mm
- Einsatz verschiedener Materialien: Kunststoff, Metall, Keramik
- Niedrige Materialkosten
- Hohe Baugeschwindigkeit
- Offene/universelle Programmierschnittstelle
- Hohe Zuverlässigkeit
- Geringe Stellfläche

Die Anforderungen Detaillierungsgrad, minimaler Bauraum und Materialien leiten sich ebenfalls aus den technischen Daten der Produkte ab. Niedrige Materialkosten und die hohe Baugeschwindigkeit beeinflussen direkt oder indirekt den Return on Investment eines additiven Fertigungssystems im Rahmen des Geschäftsmodells „individuelle Bedienelemente“. Die offene Programmierschnittstelle ist erforderlich, um die Anbindung an selbst entwickelte Softwareprogramme zu ermöglichen. Die hohe Zuverlässigkeit des Systems muss gegeben sein, damit dieser im besten Fall 24 Stunden am Tag fertigen kann. Zusätzlich begünstigt eine geringe Stellfläche die Skalierbarkeit der Fertigungssysteme durch die Möglichkeit, mehrere additive Fertigungssysteme in einer flexiblen Fertigungszelle unterzubringen.

Die additiven Fertigungssysteme sind vorrangig anhand der für die Realisierung benötigten Materialien ausgewählt worden. Außerdem sind weitere wichtige Daten in der Tabelle zusammengefasst, wie z.B. ein ungefährender Kaufpreis, Druckgeschwindigkeit, Bauraum und die verwendete Technologie. Die Druckgeschwindigkeit ist ein besonderes Kriterium, da ein schneller gedrucktes Zeichnungsteil die Durchlaufzeit eines Auftrags maßgeblich verkürzen kann. Unter der Betrachtung aller aufgelisteten Daten wird die Tauglichkeit der verschiedenen additiven Fertigungssysteme für das Geschäftsmodell „individuelle Bedienelemente“ festgestellt.

Die Anforderungsliste an den kollaborativen Roboter umfasst:

- Integrierte Sicherheitseinrichtungen (=Kollaborativität)
- Kommissionierroboter Reichweite mindestens 1,5 m
- Montageroboter Reichweite von ca. 1 m
- Maximales Traggewicht von mindestens 3 kg
- Erweiterbarkeit mit Sensoren, z.B. RFID-Scanner, Kamera
- Geeignete Greifeinrichtung
- Offene/universelle Programmierschnittstelle

Die Reichweiten für die Roboter, die Erweiterbarkeit mit Sensoren sowie die geeignete Greifeinrichtung leiten sich aus dem Fertigungskonzept ab. Das maximale Traggewicht ist aufgrund der vorerst festgelegten Produktpalette sehr niedrig festgesetzt. Wie bei den additiven Fertigungssystemen, begünstigt eine universelle Programmierschnittstelle auch bei den kollaborativen Robotern die Implementierung dieser in das Fertigungskonzept. Die Bewegungsgeschwindigkeit ist bei den kollaborativen Robotern nicht von elementarer Bedeutung, da laut dem Fertigungsprozess der Engpass bei der Erstellung der Zeichnungsteile mit den additiven Fertigungssystemen liegt.

Die Roboter sollen zwei wesentliche Aufgaben in der flexiblen Fertigungszelle übernehmen: Zeichnungs- bzw. Standardteile kommissionieren und den Menschen bei der Montage der Baugruppe unterstützen. Die dabei betrachteten Kriterien sind die spezifischen Produktfeatures, der bevorzugte Anwendungsbereich und der Preis. Auf die Darstellung der Bewegungsgeschwindigkeit als Kriterium wurde bewusst verzichtet, da diese wie bereits erwähnt, für den Fertigungsprozess nicht ausschlaggebend ist.

An das Standardteilelagersystem können folgende Anforderungen formuliert werden:

- Automatisiertes Kommissioniersystem
- Vereinzeln von Kleinteilen ermöglichen
- Maximale Teilegröße pro Teileträger (LxBxH): 250 mm x 250 mm x 50 mm
- Maximales Einzelteilegewicht: 500 g
- Geringe Stellfläche
- Offene/universelle Programmierschnittstelle

Wenn eine große Vielfalt an Kleinteilen in einem Standardteilelager untergebracht wird, kann der Kommissionierroboter nicht mehr alle Teile eines Regals erreichen. Das Lagersystem muss also automatisiert von einem bestimmten Lagerort an einem definierten Abgabeort an den Kommissionierroboter (im besten Fall bereits vereinzelt) übergeben. Die maximale Teilegröße und das maximale Teilegewicht sind vom Bauraum des additiven Fertigungssystems bzw. von den technischen Daten des Produktportfolios abhängig. Die geringe Stellfläche begünstigt wie bei den additiven Fertigungssystemen die Skalierbarkeit des Systems. Außerdem steht am geplanten Aufstellungsort der flexiblen Fertigungszelle im Baumarkt nur ein begrenzter Bereich zur Verfügung. Die offene Programmierschnittstelle ist auch hier notwendig, um die Integration des Standardteilelagers in das Gesamtfertigungskonzept zu gewährleisten.

Die Vergleichskriterien für die Lagersysteme sind das System an sich, das Lagergut und der Preis. Die Größe der Systeme kann jeweils an die genauen Anforderungen der Standardteile angepasst und bei entsprechendem Bedarf erweitert werden. Ein Shuttle-System rechnet sich allerdings eher bei voluminösen Teilen und kommt demzufolge für das Geschäftsmodell „individuelle Bedienelemente“ nicht in Betracht. Ein Paternoster ist aufgrund der größeren Stellfläche ebenfalls nicht für das Geschäftsmodell „individuelle Bedienelemente“ geeignet.

#### **5.4. Arbeitsfolgebeschreibung des CPPS**

Die dargestellte Arbeitsfolgebeschreibung gibt einen Überblick über den Fertigungsprozess anhand eines Beispiels. Als Beispiel dient hier die Fertigung eines Unterputz (UP) Lichtschalters mit Rahmen und Wippe im „Dockland“-Design. Die einzelnen Prozessschritte sind mit ihrer jeweiligen Dauer aufgeführt und farblich gekennzeichnet. Im Layout der Fertigungszelle finden sich die farblichen Kennzeichnungen in den entsprechenden Arbeitsbereichen wieder. Die Dauer der Prozessschritte wird getrennt nach Maschinenzeit und manueller Bearbeitungszeit durch den Menschen aufgeführt. Das Layout der gesamten Fertigungszelle ist so angeordnet, dass der Aktionsradius der verwendeten Roboter optimal ausgenutzt wird.

Arbeitsfolge: Fertigungsprozess: UP Schalter mit Rahmen und Wippe "Dockland"

Cycle Time:  
[min] 61  
[sec] 38

Zyklus	Nr.	Ablaufschritt	TE Maschine	TE Mitarbeiter
1		<b>Auftragsdaten in die Fertigung übergeben</b>		
	1	RFID-Chip des Teileträgers wird vom System im Zwischenlager mit Auftragsdaten beschrieben		
2		<b>Kommissionierung Normteile</b>	1'46"	
	2	Kommissionierroboter entnimmt Teileträger, liest Stückliste aus und fährt zum Normteilelager	11"	
	3	Normteile lt. Stückliste werden aus dem Lager entnommen und in Teileträger gesammelt	1'25"	
	4	Teileträger wird beim 3D-Drucker bereitgestellt	10"	
3		<b>Erstellung Druckteile</b>	54'	
	5	3D-Drucker liest 3D-Druckinfo (Modellnummer) vom RFID-Chip des Teileträgers		
	6	3D-Drucker lädt Modelldaten aus zentraler Datenbibliothek		
	7	Druckvorgang	54'	
4		<b>Entnahme und Bereitstellung Druckteile</b>	30"	
	8	Drucker meldet AG-Ende an Kommissionierroboter		
	9	Kommissionierroboter entnimmt Druckteile aus 3D-Drucker und legt sie im Teileträger ab	20"	
	10	Teileträger wird in Zwischenlager bereitgestellt	10"	
5		<b>Vorbereitung zur Montage</b>	25"	
	11	Kollaborierender Roboter holt Teileträger aus dem Zwischenlager	15"	
	12	Norm- und Druckteile werden auf Montageplatz bereitgestellt	10"	
	13	Teileträger übergibt Arbeitsplan via RFID-Chip an Terminal, Arbeitsplan wird angezeigt		
6		<b>Montage lt. Arbeitsplan</b>		3'50"
	14	Druckteile (Rahmen und Wippe) entgraten und prüfen		3'15"
	15	Halteklammer an der Wippe montieren		7"
	16	Wippe und Rahmen auf Schalter montieren		16"
	17	Bauteile in Teileträger legen, bereitstellen und Auftrag fertig melden		12"
7		<b>Übergabe an Logistik</b>	1'07"	
	18	kollaborierender Roboter bringt Teileträger in Scanbereich der Verpackungsstation	10"	
	19	Verpackungsstation scant RFID-Chip und übergibt Info über vorgesehene Abstellfläche		
	20	kollaborierender Roboter entleert Teileträger in Transportverpackung auf der Abstellfläche	22"	
	21	kollaborierender Roboter stellt leeren Teileträger im Zwischenlager ab	14"	
	22	Transportverpackung wird per Förderband in freiem Fach in der Abholstation bereit gestellt	19"	

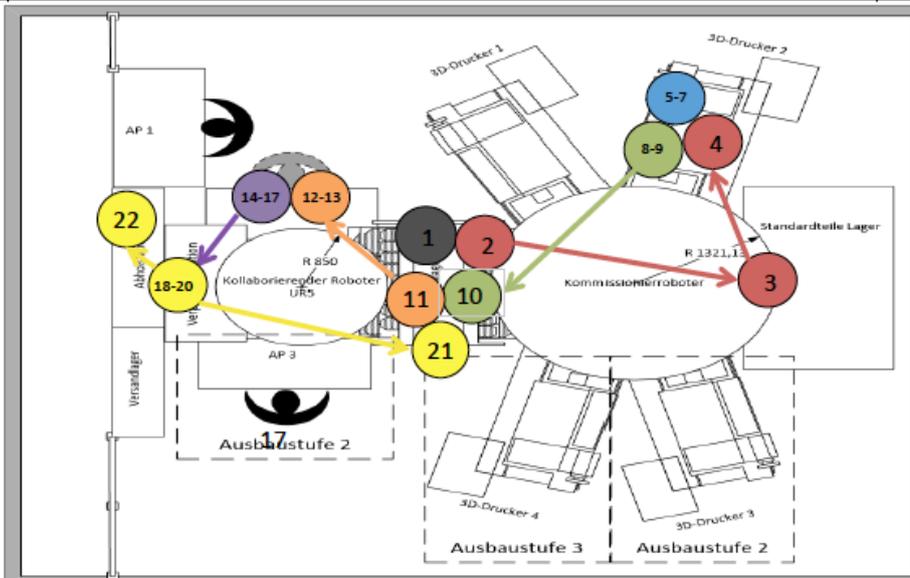


Abbildung 16: Layout des CPPS und Arbeitsfolgebeschreibung

Im Rahmen der technischen Planung wurde eine Fehlermöglichkeiten- und -einflussanalyse auf den Fertigungsprozess, kurz eine Prozess-FMEA, durchgeführt. Ziel war es, zum einen mögliche Gefährdungen der Mitarbeiter oder anderer Personen im Fertigungsprozess durch bspw. Roboter zu identifizieren, zum anderen sollten mögliche Prozessfehler bereits vor der modellhaften Realisierung identifiziert werden. Diese wurden mit adäquaten Maßnahmen belegt, die außerdem noch in der modellhaften Realisierung berücksichtigt werden konnten.

Smart Factory - flexible Fertigungszelle Elmshorn				Verantw. FMEA Moderator: Steffen Rittmann		Verantw. Industrial Engineer: Simon Böttcher		AZ: 1 Datum: 04.08.2015							
Prozess-Schritt	Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ1	geplante Vermeidungsmaßnahmen	A	geplante Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ2	
Befüllung mit Standardteilen	Kiste bricht	5	Kiste beschädigt	Teile zu schwer	1) Verwendung einer Standardkiste 2) Maximal Teile für ein Produkt je Auftrag		Optische Inspektion durch den Mitarbeiter (Detektion vorgeschädigte Kiste) Gewichtssensor, wenn Kiste runter fällt	5	75						
Befüllung mit Standardteilen	Teile stecken in Kiste fest	4	Kiste beschädigt	Teile scharfkantig	Keine		Optische Inspektion durch den Mitarbeiter (Detektion vorgeschädigte Kiste)	5	200	Auskleidung der Kiste	3			5	60
Befüllung mit Standardteilen	Kiste defekt, Teile in der Kiste defekt	4	Kiste beschädigt	zu hohe Fallhöhe der Standardteile	Keine		Optische Inspektion durch den Mitarbeiter (Detektion vorgeschädigte Kiste)	5	200	Vermeidung hoher Fallhöhen	4			5	80
Befüllung mit Standardteilen	Teile fehlen bei der Montage	4	Teile fallen neben die Kiste	Roboter falsch positioniert	1) Verwendung einer Standardkiste mit ausreichender Größe für Positionierungstoleranzen		Optische Inspektion durch den Mitarbeiter (Vollständigkeitsprüfung, Teil nicht montierbar)	3	48						
Befüllung mit Standardteilen	Zu wenig Teile bei Montag AP2/3 in Kiste (wichtigerer Fehler als zu viele Teile)	4	Teile fallen in falscher Menge in die Kiste	Fehlerhafte Vereinzelung am Standardteilelager	Plauscheck über Gewichtssensor		Optische Inspektion durch den Mitarbeiter (Vollständigkeitsprüfung, Teil nicht montierbar)	3	72						
Transport 1-2 und weitere Transporte	Kiste defekt, Teile in der Kiste defekt	6	Roboter fährt mit Kiste gegen ein Hindernis (Wand, 3-D Drucker)	Kiste zu groß	Verwendung von gleich großen Standardkisten für alles		1) Durchführung eines Probeaufs für eine Kiste 2) Durchführung eines Programms mit zwei Kisten	5	90				Durchführung eines Probeaufs für einen kompletten Umlauf (13 Kisten)	4	72

Abbildung 17: Prozess-FMEA

## 5.5. Investitionsplanung

Die Investitionsplanung ergibt sich aus der aufgezeigten Gestaltung der Fertigungszelle. Diese weist in ihrem Aufbau zunächst Plätze für vier additive Fertigungssysteme vor. Diese sollten abhängig von ihren Fähigkeiten aus verschiedenen Systemen besetzt werden, um möglichst viele Fähigkeiten abzudecken. Die folgende Tabelle zeigt die ausgewählten Systeme auf. Die additiven Fertigungssysteme sollten in der Reihenfolge der Liste beschafft werden, sobald eine Kapazitätserweiterung sinnvoll ist.

Anzahl	Gerät	Verwendung/Funktion	Schätzkosten
1	Stratasys Objet260 Connex3	für mehrfarbige Zeichnungsteile aus Kunststoff	140.000 €
1	EOS Formiga P110	für Zeichnungsteile aus Kunststoff/Metalloberfläche	200.000 €
1	3D Systems sPro 60	für Zeichnungsteile aus Kunststoff	300.000 €
1	SLM 280 HL	für Zeichnungsteile aus Metall/Keramik	450.000 €
		<b>Summe</b>	<b>1.090.000 €</b>

Abbildung 18: Schätzkosten ausgewählter Elemente des CPPS: additive Fertigung

Des Weiteren werden für den Aufbau zwei kollaborierende Roboter benötigt. Hier sind die Roboter vom Typ UR5 der Firma Universal Robots besonders geeignet.

Anzahl	Gerät	Verwendung/Funktion	Schätzkosten
2	UR5	koll. Roboter für Packstation, Arbeitsplatz Mensch, Direktübergabe	22.500 €
		<b>Summe</b>	<b>45.000 €</b>

Abbildung 19: Schätzkosten ausgewählter Elemente des CPPS: kollaborative Roboter

Weitere Investitionskosten entstehen für die Ausgestaltung der Lagersysteme. Das Standardteilelager ist dabei als Liftsystem spezifiziert, um auf geringem Platz eine hohe Anzahl verschiedener Teile lagern zu können. Die Aufträge werden in Transportboxen zusammengestellt und in einem Zwischenlager zur Montage bereitgestellt.

Anzahl	Gerät	Verwendung/Funktion	EK
1	Hänel Leanliftsystem	Lagerung Normteile/Standardteile	25.000 €
50	Lagerboxen	für Aufträge	500 €
1	Bereitstellregal	Zwischenlager	700 €
<b>Summe</b>			<b>26.200 €</b>

Abbildung 20: Schätzkosten ausgewählter Elemente des CPPS: Lagersysteme

Für die manuellen Arbeitsplätze und die anschließende Verpackung und Bereitstellung der Pakete für den Kunden ergeben sich abschließend die folgenden Kosten.

Anzahl	Gerät	Verwendung/Funktion	Schätzkosten
3	Werkbank	Arbeitsplatz Mensch, Packstation, Direktübergabe an Kunden	800 €
1	Bildschirm	Informationsanzeige für Mensch	300 €
1	Werkzeugsatz	für Arbeitsplatz Mensch	1.000 €
1	Verpackungsanlage	automatische Verpackung der Aufträge	15.000 €
1	Paketstation	Bereitstellung für den abholenden Kunden	5.000 €
<b>Summe</b>			<b>23.700 €</b>

Abbildung 21: Schätzkosten ausgewählter Elemente des CPPS: manuelle Arbeitsplätze

Somit ergeben sich insgesamt Investitionskosten von ca. 1.200.000,- € für den vollständigen Aufbau der Fertigungszelle. Diese Investition sollte in Ausbaustufen durchgeführt werden. Zunächst sollte der Aufbau der Fertigungszelle realisiert werden. Hierfür werden der menschliche Arbeitsplatz, das Lagersystem und die beiden kollaborierenden Roboter vollständig benötigt. Es sollten zunächst jedoch nur die beiden ersten additiven Fertigungssysteme beschafft werden, um eine zu hohe Kapitalbindung zu vermeiden.

Anzahl	Gerät	Verwendung/Funktion	EK
1	Stratasys Objet260 Connex3	für mehrfarbige Zeichnungsteile aus Kunststoff	140.000 €
1	EOS Formiga P110	für Zeichnungsteile aus Kunststoff/Metall*	200.000 €
<b>Summe kollaborierende Roboter</b>			<b>45.000 €</b>
<b>Summe Lagersystem</b>			<b>26.200 €</b>
<b>Summe Arbeitsplätze</b>			<b>23.700 €</b>
<b>Summe</b>			<b>434.900 €</b>

Abbildung 22: Schätzkosten ausgewählter Elemente des CPPS: ausgewählte Ausbaustufe

## 5.6. Kalkulation der Herstellkosten

Für die Kalkulation der Herstellkosten wird das Produkt mit folgenden Eigenschaften beispielhaft betrachtet.

	Abmessungen			max. Volumen	Materialvolumen (ccm)	Gewicht (g)	Material
	Länge (mm)	Breite (mm)	Höhe (mm)				
Docklanddesign - Rahmen	230	78	11	197,34	31,0	33	ABS
Docklanddesign - Schalter	198	66,5	8,25	108,63	36,0	38	ABS

Abbildung 23: Produkteigenschaften für die Beispielkalkulation

Für den ersten Mitarbeiter ergibt sich aus der Annahme von 200 Arbeitstagen im Jahr mit durchschnittlich 8 Stunden pro Tag eine Kapazität von 1600 Stunden im Jahr. Umgelegt auf angenommene Jahreslohnkosten von 45.000,- € ergibt dies einen Stundensatz von 28,13 €. Der Montageaufwand des Mitarbeiters beträgt ca. eine Minute je Produkt. Das Produkt besteht dabei aus zwei additiven Fertigungsteilen. Dieser geringe Montageaufwand des Mitarbeiters ermöglicht einen theoretischen Output von 60 Produkten in der Stunde und damit 2400 Produkten in der Woche. Bei einem Leistungsgrad von 80% entspricht dies 1920 Produkten in der Woche. Die folgende Tabelle zeigt die Wochenproduktion der ausgewählten additiven Fertigungssysteme unter der Annahme einem OEE (Overall-Equipment-Effectiveness) von 85%.

Ausbaustufe	1.	1.	2.	3.
	Stratasys Objet260 Connex3 EOS Formiga P110 3D Systems sPro 60 SLM 280 HL			
Besonderheiten	mehrfarbige Kunststoffteile		Kunststoff mit Aluop einfarbige Kunststoffe Metall/Keramik	
<b>Geschwindigkeit</b>	12mm/h	20mm/h	900ccm/h	45ccm/h
Dauer Druckvorgang		0,9	0,6	0,0
Dauer Druckvorgang		0,7	0,4	0,0
Teile pro Druckvorgang		3,0	2,0	4,0
Teile pro Druckvorgang		3,0	3,0	5,0
Teile pro h		3,3	3,6	29,0
Teile pro h		4,4	7,3	25,0
Set pro h		1,9	2,7	13,5
Wochenproduktion		467,3	519,3	4145,8
Wochenproduktion		623,1	1038,5	3570,0
<b>Wochenproduktion</b>		<b>272,6</b>	<b>389,5</b>	<b>1929,0</b>

Abbildung 24: Beispielhafte Wochenproduktion additiver Fertigungssysteme

Für die ausgewählte erste Ausbaustufe mit den ersten beiden additiven Fertigungssystemen und einem Mitarbeiter für die Beratung, Konstruktion und die Montage ergibt sich somit bei Vollausslastung (OEE=85%) eine Ausbringungsmenge von maximal 662 Produkten pro Woche. Dies entspricht in etwa einem Drittel der Arbeitszeit, sodass ca. zwei Drittel der Arbeitszeit für Beratung und Konstruktion zur Verfügung stehen.

Aus den Materialgrundpreisen und dem Gewicht der Bauteile lassen sich die Materialkosten für das Produkt ableiten. Die Materialkosten für eine Halteklammer als Verbindung zum Standard-Funktionselement werden mit 0,20€ angenommen. Die Fertigungskosten beruhen auf dem Stundensatz von 28,13€ und einer Montagezeit von einer Minute. Die Verwaltungskosten werden mit 20% angenommen. Somit ergeben sich die folgenden Herstell- und Selbstkosten.

	Stratasys Objet260 Con	EOS Formiga P110	3D Systems sPro 60	SLM 280 HL
Materialpreis pro kg	200,00 €	80,00 €	80,00 €	90,00 €
MEK 3D-Druck Set	14,20 €	5,68 €	5,68 €	6,39 €
MEK Standardteile	0,20 €	0,20 €	0,20 €	0,20 €
FEK	0,47 €	0,47 €		
			0,39 €	0,39 €
<b>HK</b>	<b>14,87 €</b>	<b>6,35 €</b>	<b>6,27 €</b>	<b>6,98 €</b>
Verwaltungszuschlag 20%	2,97 €	1,27 €	1,25 €	1,40 €
<b>SK</b>	<b>17,84 €</b>	<b>7,62 €</b>	<b>7,52 €</b>	<b>8,38 €</b>

Abbildung 25: Beispielhafte Herstell- und Selbstkosten

Die erzielbaren Marktpreise werden aus vergleichbaren Varianten aktueller Anbieter abgeleitet.

a	Standard	4,84 €
b	Design (Wippe ABS Design, Rahmen 1f ABS+Edelstahl)	36,01 €
c	Sonderaktion BVB (Set ABS BVB lackiert)	29,47 €
d	High-End (Porzellan)	84,75 €

Abbildung 26: Beispielhafte Vergleichsverkaufspreise marktüblicher Produkte

Ein Vergleich des Produktes mit den Fähigkeiten der einzelnen additiven Fertigungssysteme führt zu den folgenden möglichen Verkaufspreisen.

	Stratasys Objet260 Connex3 mehrfarbige Kunststoffteile	EOS Formiga P110 Kunststoff mit Aluoptik	3D Systems sPro 60 einfarbige Kunststoffe	SLM 280 HL Metall/Keramik
Vergleichsprodukt	c	b	c	d
VK	29,47 €	36,01 €	29,47 €	84,75 €
<b>SK</b>	<b>17,84 €</b>	<b>7,62 €</b>	<b>7,52 €</b>	<b>8,38 €</b>
<b>Marge</b>	<b>11,66 €</b>	<b>28,38 €</b>	<b>21,98 €</b>	<b>76,42 €</b>
<b>Marge in %</b>	<b>40%</b>	<b>79%</b>	<b>74%</b>	<b>90%</b>

Abbildung 27: Beispielhafte Verkaufspreise kundenindividueller Bedienelemente

Die hohe Marge ist damit zu erklären, dass die Investitionskosten nicht in der Kalkulation enthalten sind. Die Verzinsung des investierten Kapitals muss somit aus dieser Marge erzielt werden. In der ersten Ausbaustufe würden sich aus den Investitionskosten von ca. 435.000,-€ bei einer erwarteten Rendite von 10% eine Summe von 43.500,-€ ergeben. Zusätzlich müssten die Personalkosten, die nicht in die Montage verrechnet werden aus der Rendite erzielt werden. Dies wären bei einem Jahresgehalt von 45.000,-€ und nur einem Drittel Montagetätigkeit ca. 30.000,-€ zusätzlich. Somit müssten 73.500,-€ über die Rendite gedeckt werden. Dies ergibt bei einer gleichmäßigen Auftragsverteilung über beide Anlagen in der ersten Ausbaustufe einen Break-Even bei ca. 4000 hergestellten Produkten pro Jahr, was in etwa einer halben Jahresproduktion (OEE = 85%) entspricht.

### 5.7. Modellhafter Aufbau des CPPS

Die Umsetzbarkeit des Geschäftsmodells und der flexiblen Fertigungszelle soll im Folgenden nicht weiter theoretisch sondern unter realen Bedingungen betrachtet werden. Dazu wurde für Anschauungs- und Vorführzwecke ein Demonstratormodell im Maßstab 1:1 erstellt. Der Aufbau der flexiblen Fertigungszelle wurde im Labor Technik der NORDAKADEMIE in Elmshorn durchgeführt.

Nachfolgend sind einige Stationen dargestellt, die eine gesonderte Erläuterung verdienen. Die folgenden Stationen sind im Fertigungslayout markiert.

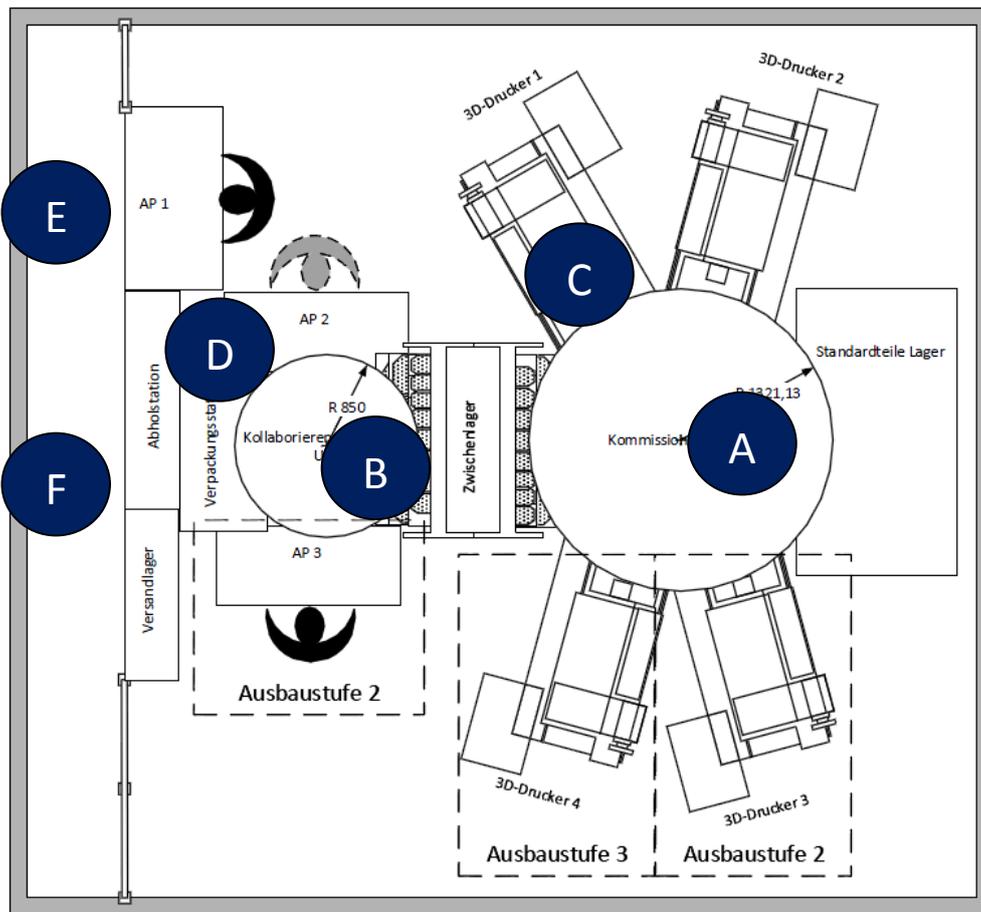


Abbildung 27: Layout des CPPS



Abbildung 28: Modellhafter Aufbau des CPPS: A – Lager Standardteile; B – Zwischenlager; C – Additive Fertigung (von links)

Das realisierte Lagersystem für die Standardteile (A) unterscheidet sich deutlich von dem Vertikallagersystem, welches bei der Kalkulation betrachtet worden ist. Die Kleinteile werden in den verschiedenen kleinen blauen Lagerboxen gelagert, die an den Gitterboxen befestigt sind. Die Vereinzelung der Kleinteile wird dadurch erreicht, dass der Kommissionierroboter mit dem roten Auftrags-Teileträger unter die jeweilige blaue Lagerbox fährt und ein Kleinteil in den roten Teileträger fällt. Die Vereinzelung wurde manuell simuliert.

Auf der unteren Ebene des Zwischenlagers (B) sind die leeren roten Auftrags-Teileträger angeordnet und das Regal ist zur Seite des Kommissionierroboters geneigt, damit die Teileträger automatisch durchrutschen können. Die obere Ebene trägt die fertig gepackten Auftrags-Teileträger, welche durch die Neigung automatisch auf die Seite des Montagearbeitsplatzes herunterrutschen. Das Greifen der Auftrags-Teileträger erfolgt durch Unterhaken des Kommissionierroboters unter die vordere Kante des Auftrags-Teileträgers mithilfe eines Aufnahmeadapters. Es erfolgt also kein wirkliches Greifen. Dies hat zum Vorteil, dass es einfach umzusetzen ist und auch die Programmierung deutlich vereinfacht wird, da kein zusätzlicher Greifer angesteuert werden muss. Der Nachteil dieser Methode ist allerdings, dass durch den Aufnahme-Adapter die Verletzungsgefahr durch den kollaborativen Roboter steigt, sodass dieser ggf. nicht mehr als kollaborativ betrachtet werden kann und deshalb ähnliche Sicherheitseinrichtungen wie bei einem normalen Industrieroboter nötig wären.

Vor jedem additiven Fertigungssystem (C) ist jeweils ein Bereich zu sehen, wo zwei bis vier rote Auftrags-Teileträger geparkt werden können. Diese sind erhöht aufgebaut, damit der Kommissionierroboter die Auftrags-Teileträger optimal greifen kann. Unter den additiven Fertigungssystemen kann direkt das für die additiven Fertigungsverfahren benötigte Filament gelagert werden.



*Abbildung 28: Modellhafter Aufbau des CPPS: D – Montagearbeitsplatz; E – Kundenberatung; F – Verpackungs- und Abholstation (von links)*

Der Montagearbeitsplatz (D) ist ausgestattet mit einem Annahme- und Abgabebereich des roten Auftrags-Teileträgers. Diese sind ebenfalls erhöht aufgebaut, damit der Montageroboter die Teileträger richtig transportieren kann. Des Weiteren besitzt dieser Arbeitsplatz zwei Monitore, auf denen zum einen der Arbeitsplan sowie die fertige Baugruppenzeichnung des jeweiligen Auftrags angezeigt wird. Der Montagearbeiter entnimmt die Teile aus dem Auftrags-Teileträger auf der dafür vorgesehenen Arbeitsunterlage. Dort prüft er zunächst die Abmessungen des gedruckten Zeichnungsteils und arbeitet dies ggf. nach. Danach setzt er die Baugruppe gemäß dem Arbeitsplan zusammen und wickelt diese in Luftpolsterfolie ein. Zum Schluss packt er die eingepackte Baugruppe in den roten Auftrags-Teileträger und stellt diesen auf die Ablagestation, wo der Montageroboter diesen aufnimmt.

In der Kundenberatungsstelle (E) wird der Auftrag eines Kunden genau spezifiziert und die Baugruppe gemäß Wunsch in einem 3D-CAD Programm von einem Mitarbeiter gezeichnet. Dies kann der Kunde live auf dem zweiten Monitor mitverfolgen. Weitere Ausstattung des AP1 ist ein Zeichenblock mit Zeichenutensilien, damit der Kunde eine grobe Skizze seines individuellen Bedienelements erstellen kann, aus der der Kundenberater eine professionelle 3D-CAD Zeichnung erstellt.

Der Verpackungs- und Abholstation (F) wird in der modellhaften Realisierung vereinfacht aufgebaut. Auf der Verpackungsstation ist ein RFID-Scanner installiert, der die Auftragsdaten des roten Auftrags-Teileträgers scannt und diesem Verpackungs- und Versandinformationen entnimmt. Unterschiedliche Verpackungsgrößen sind durch den großen und den kleinen Karton verdeutlicht. Die Abholstation ist prinzipiell aufgebaut wie eine DHL-Packstation. Der Kunde entnimmt seinen Auftrag aus einem vorgesehenen Fach per Smartphone App. Für Versandaufträge befindet sich zusätzlich ein Versandlager in der Nähe der Verpackungsstation, welches mit einer leeren Gitterbox angedeutet wird.

Folgende Erkenntnisse können aus der Realisierung der flexiblen Fertigungszelle im Demonstrator gewonnen werden:

- flexibles Fertigungskonzept ist möglich und funktionsfähig
- die Höhe der Aufnahme- und Ablagepositionen ist abhängig von dem Arbeitsbereich der kollaborativen Roboter
- die schiefen Ebenen des Zwischenlagers ermöglichen eine einfache und effektive Art der Lagerung und Weitergabe der Auftrags-Teileträger an die kollaborativen Roboter
- die Aufnahme und der Transport der Auftrags-Teileträger erfolgt nicht durch Greifen, sondern durch Unterhaken mit einem Aufnahme-Adapter
- die Ablage-/Aufnahmestation vor den additiven Fertigungssystemen ermöglicht eine nahtlose Versorgung dieser mit neuen Aufträgen, sodass Durchlaufzeiten signifikant reduziert werden können
- kompakte Bauart der Fertigungszelle kann im Demonstrator bestätigt werden
- Optimierungspotenzial bestand im Fertigungsplan; Verpackungs-, Versand- und Abholstation konnten nah beieinander realisiert werden; zweiter optionaler Montagearbeitsplatz wurde hinzugefügt, welcher die Skalierbarkeit des Gesamtsystems erhöht
- sehr gut als Forschungsprojekt geeignet, da viele unabhängige Teilprojekte realisiert werden können

## 6. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Geschäftsmodelle identifiziert, priorisiert und ein geeignetes Geschäftsmodell zur Darstellung der Potentiale der Vision Industrie 4.0 ausgewählt. Des Weiteren sollte ein Produkt ausgewählt werden, bei welchem individuelle Teile und Standardteile kombiniert und in einer Fertigungszelle unter Verwendung von kollaborierenden Robotern gefertigt werden. Mittels Nutzung geeigneter Kreativitätstechniken wie bspw. Brainwriting, konnte das Konzept „individuelle Bedienelemente“ identifiziert und in der Folge ausgebaut werden.

Das Ziel der Arbeit, ein tragfähiges Geschäftsmodell in dem Forschungskontext „Industrie 4.0“ auszugestalten, wurde erreicht. Hierbei war insbesondere das iterative Vorgehen in drei Phasen (Definition, Analyse, Realisierung) hilfreich, um ein Geschäftsmodell auszuwählen. Die Realisierung konnte mit einem Demonstrationsaufbau und einer Prototypenfertigung erfolgreich abgeschlossen werden. Darüber hinaus konnten angrenzende Themengebiete identifiziert werden, die für eine vollständige Ausgestaltung der Fertigungsanlage im Rahmen weiterer Projekte betrachtet werden können.

Obwohl in den beispielhaften Berechnungen eine wirtschaftliche Attraktivität nachgewiesen werden konnte, ist für eine vollständige Umsetzung dennoch eine erhebliche Investition erforderlich, wodurch eine Umsetzung unter ökonomischen Gesichtspunkten risikoreich ist. Hier könnten in der Zukunft insbesondere die Weiterentwicklung und Kostensenkung von additiven Fertigungsmethoden einen Beitrag zur Senkung der Investitionen und damit der Markteintrittsbarrieren leisten.

Das Projekt zeigte, dass eine Fertigung, die eine hohe Flexibilität und Modularität aufweist, viele Vorteile bietet. So ist es unter der Voraussetzung, dass die definierten Schnittstellen eingehalten werden, gelungen eine Unabhängigkeit von Form, Farbe und Material zu schaffen und dennoch zu sehr attraktiven Preisen zu produzieren. Darüber hinaus wurde in Form von beschriebenen Ausbaustufen eine Skalierbarkeit demonstriert, die besonders durch die Schaffung von Wertschöpfungsnetzwerken ein zusätzliches Potenzial aufweist. Die Prozessbeschreibung des Projektes zeigt zudem die Rolle des Menschen in der Produktion auf. Der Mensch ist insbesondere in der Kundenberatung, Prozessüberwachung und bei komplexen Montagevorgängen erforderlich. Dies zeigt auch eine mögliche Veränderung des Anforderungsprofils an Mitarbeiter, die hierfür entsprechend qualifiziert sein müssen.

Eine industrielle Revolution ist aus Sicht des Projektteams jedoch nicht zu erwarten, da in vielen Bereichen die Standardisierung auf Grund der Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit einen zu hohen Stellenwert genießt. Dennoch besteht ein großes Potenzial für Produkte und Geschäftsmodelle, die durch die Anpassung an individuelle Kundenbedürfnisse die Lebensqualität steigern und durch die auftragsbezogene Produktion eine Überproduktion verhindern, wodurch ressourcenschonend und nachhaltig produziert werden kann. Somit ist aus Sicht des Projektteams die hohe gesellschaftliche Relevanz des Themengebietes „Industrie 4.0“ bestätigt und die Herausstellung als politischer Förderschwerpunkt gerechtfertigt.

## 7. Literaturverzeichnis

- [ACT2013] Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft (Hrsg.): „Umsetzungsempfehlung für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., 2013.
- [AHR2012] Ahrens, V.: „Inflation industrieller Revolutionen“, Productivity Management 17 (2012), Seite 30 ff..
- [BAU2014] Bauernhansl, Th.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): „Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik“, Springer Vieweg, 2014.
- [BEY2013] Beyer, Chr.; Kochan, D.: „Innovationspotenzial der Generativen Fertigung“, in: Feldhusen, J; Grote, K.-H. (Hrsg.): „Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung“, Springer Vieweg, 2013.
- [BMW2015] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Industrie 4.0: Volks- und Betriebswirtschaft-liche Faktoren für den Standort Deutschland“, Berlin, 2015.
- [BRE2011] Brenner, W.; Witte, Chr.: „Business Innovation: CIOs im Wettbewerb der Ideen“, Frankfurter Allgemeine Buch, 2011.
- [BVZ2015] BITCOM e.V.; VDMA e.V.; ZVEI e.V. (Hrsg.): „Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0“, Berlin, 2015.
- [DEB2015] Deburba, F; Neurohr, R. E.: „Digitale Transformationen in deutschen Kernindustrien“, Exklusivstudie der Unternehmensberatung Infront Consulting & Management mit dem Wirtschaftsmagazin Capital, Infront Consulting & Management GmbH, Hamburg, 2015.
- [GAS2013] Gassmann, O.; Frankenberger, K.; Csik, M.: „Geschäftsmodelle entwickeln: 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator“, Hanser Verlag, 2013.
- [HER2005] Herstatt, C.; Lüthje, C.: „Quellen für Neuproduktideen“, in: Albers, S., et al: „Handbuch Technologie und Innovationsmanagement“, GWV Fachverlage, 2005.
- [MEU2015] Meussen, B.: „Anwendung von Industrie 4.0 in Forschung und Praxis“, Arbeitspapiere der Nordakademie Nr. 2015-13.
- [OST2011] Osterwalder, A.; Pigneur, Y.: „Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers and Challengers“, John Wiley & Sons, 2010
- [TEE2010] Teece, D. „Business Models, Business Strategy and Innovation“, in: Long Range Planning, Vol. 43 Issue: 2-3, Seite 172ff..
- [VDI2014] VDI e.V.: „Industrie 4.0: Statusreport Wertschöpfungsketten“, VDI, April 2014.