

1 Einleitung

Die Vernetzung von Produktionsanlagen und die unmittelbare Verknüpfung von Parametern von Produkten und Werkstücken mit dem Produktionssystem durch internetbasierte Technologien sind wesentlicher Bestandteil der gängigen Industrie-4.0-Definitionen.¹ Das übergeordnete Ideal besteht dabei in sich selbst konfigurierenden Produktionsanlagen gesteuert durch Systeme, die Entscheidungsalternativen im komplexen Produktionsumfeld vorbereiten und so zur Optimierung der Abläufe beitragen.²

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht dabei die Frage, mit welchen Methoden die Vernetzung im Bereich der Arbeitsvorbereitung bei der Gestaltung von Vorrichtungen und Montagehilfsmitteln gelingen kann. Fokussiert werden also Betriebsmittel, bei denen z. B. Produktänderungen eine Neugestaltung oder eine Anpassung der Gestalt auslösen können.³ Die vielerorts benötigten Hand-, Hilfs- und Vormontagevorrichtungen für die Montage werden heute zwischen verschiedensten Stakeholdern abgestimmt und bei externen Partnern gefertigt.⁴ Langwierige Gestaltungszyklen sind die Folge.⁵ Die Relevanz dieser Fragestellung wird im nachfolgenden Abschnitt anhand zentraler Herausforderungen aus Produkt- und aus Produktionsperspektive erläutert. Anschließend werden eine Abgrenzung des Untersuchungsbereichs sowie eine Darstellung des Aufbaus der weiteren Arbeit vorgenommen.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Wie selten zuvor steht die Automobilindustrie bei der Einführung neuer Produkte vor großen Herausforderungen angesichts Trends wie der Digitalisierung des Fahrzeugs, der Elektromobilität, des Autonomen Fahrens oder Sharing-Modellen.⁶ So führt beispielsweise die Elektrifizierung des Antriebsstrangs dazu, dass sich Fahrzeugkonzepte tiefgreifend wandeln.⁷ Der Wandel zur Elektromobilität führt unter anderem dazu, dass ein Mix verschiedener Antriebsstrangkonzeppte aus rein-elektrischen, hybriden oder auch mit Brenn-

¹ Vgl. Gausemeier u. a., *Industrie 4.0*, 2016, S.11 für den Gedanken der Ad-hoc-Vernetzung aller Ressourcen im Produktionssystem und acatech, *Was ist Industrie 4.0?*, 2018 für den Aspekt der Vernetzung von Produktionsanlagen.

² Vgl. Gausemeier u. a., *Industrie 4.0*, 2016, S. 43.

³ Vgl. Abulawi, „Ansatz zur Beherrschung der Komplexität von vernetzten 3D-CAD-Modellen“, 2012, S. 239, die darstellt, dass diese Anpassung für Karosseriebauvorrichtungen heute entlang der parallelen Produktdetaillierung und der anlaufenden Produktionsplanung iterativ durchgeführt wird.

⁴ Vgl. Pahl u. a., *Konstruktionslehre*, 2007, S. 10 für die Schnittstellen der Betriebsmittelgestaltung zu weiteren Bereichen in der Produktion.

⁵ Vgl. Abulawi, „Ansatz zur Beherrschung der Komplexität von vernetzten 3D-CAD-Modellen“, 2012, S. 38.

⁶ Vgl. Ehlers, „Mobility of the Future – Connected, Autonomous, Shared, Electric“, 2018.

⁷ Vgl. Röth u. a., „Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen“, 2013, S. 238.

stoffzellen betriebenen Modellen in der Produktion wirtschaftlich fertigbar sein muss.⁸ Zudem führen auch immer weiter diversifizierende Kundenanforderungen dazu, dass die Variantenvielfalt bezüglich der Ausstattungsumfänge hoch bleibt. Übergreifend besteht für die Hersteller die Notwendigkeit, die Entwicklungsaufwände zu reduzieren und gleichzeitig die Zeit bis zur Markteinführung zu reduzieren. Daher müssen, bedingt durch die Variantenvielfalt und die Anforderungen an eine kurze Time-to-Market, immer mehr Inhalte in immer kürzerer Zeit in einem Fahrzeugprojekt geplant, entwickelt und abgesichert werden.⁹

Einher mit diesen Produkt-Trends gehen Herausforderungen für die Produktion, die nachfolgend ausgehend vom Ziel-Dreieck aus Zeit, Kosten und Qualität dargestellt werden. Zunächst folgen aus der angestrebten Reduktion der Time-to-Market kurze Zeitschienen für die Planungsprozesse der Produktion. Daraus leitet sich insbesondere der Bedarf ab, schnell und flexibel neue Produktionsprozesse und -anlagen aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Damit einher geht die Forderung nach einer zunehmenden Flexibilisierung der Produktionsplanung und -realisierung und den damit einhergehenden Handlungsfeldern wie der Struktur- und Detailplanung mit den Teilbereichen der Anlagen- und Betriebsmittelbeschaffung.¹⁰ Die vorliegende Arbeit stützt sich dabei auf den Flexibilitätsbegriff für die Produktionswirtschaft nach LETMATHE:

- *Quantitative Flexibilität* für die Fähigkeit, bei Nachfrageschwankungen Stückzahlanpassungen vornehmen zu können.
- *Qualitative Flexibilität* für die Fähigkeit, die Produktionsprozesse ausgehend von geänderten Produkteigenschaften anzupassen.
- *Zeitliche Flexibilität* für die Fähigkeit, schnell neue Aufgaben in die Produktion zu integrieren.¹¹

Übersetzt auf die Bereitstellung von Betriebsmitteln bedeutet dies, dass diese flexibel an Stückzahlenschwankungen anpassbar sein müssen und veränderte Produkteigenschaften wie Geometrieänderungen schnell und kostengünstig umsetzen müssen, Rüst- bzw. Rekonfigurationszeiten zu mindern.¹² Aus der zeitlichen Flexibilität leitet sich darüber hinaus einerseits die Anforderung ab, dass Betriebsmittel schnell bereitstellbar sein müssen – andererseits sind vorhandene, flexible Betriebsmittel aber ebenso ein Befähiger für schnelle Änderungen der Produktionsprozesse.

Die Erschließung neuer Märkte und die Lokalisierung von Produktionsumfängen zur Kostenreduktion sorgen daneben für einen zusätzlichen Bedarf, schnell und mit begrenztem Aufwand neue Montagewerke errichten zu können.¹³ Schon heute erfolgt die Lokalisierung der Montage im ersten Schritt mittels sogenannter Completely Knocked Down

⁸ Vgl. Röth u. a., „Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen“, 2013, S. 238 für eine Darstellung der tiefgreifenden Veränderungen im elektrischen ggü. dem konventionellen Antriebsstrang; vgl. Propfe, „Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen“, 2015, S. 1 und Rauen u. a., *Antrieb im Wandel*, 2018, S. 4 für ein Verständnis des Übergangs hin zur Elektromobilität; vgl. Kampker, *Elektromobilitätsproduktion*, 2014, S. 240 für die Implikationen auf die Prozessgestaltung.

⁹ Vgl. Schäuuffe und Zurawka, *Automotive Software Engineering*, 2016, S. 1.

¹⁰ Vgl. Steimer u. a., „Approach for an Integrated Planning of Manufacturing Systems Based on Early Phases of Product Development“, 2016, S. 467f.

¹¹ Vgl. Letmathe, *Flexible Standardisierung*, 2002, S. 23.

¹² Vgl. Willy, *Vorrichtungssysteme für die flexibel automatisierte Montage*, 1994, S. 21.

¹³ Vgl. Lang und Gerrits, *Beyond BRIC: Winning the Rising Auto Markets*, 2013, S. 4.

(CKD)- oder Semi Knocked Down (SKD)-Werke, die später bei positiver Marktentwicklung zu Vollwerken ausgebaut werden können.¹⁴ Auch in diesen Werken des global verteilten Produktionsnetzwerks sind die benötigten Betriebsmittel und Werkzeuge vorzuhalten bzw. bereitzustellen.¹⁵ Zahlreiche Praxisbeiträge aus der Automobilindustrie zeigen, dass dafür gerade die Additive Manufacturing (AM)-Technologien als vielversprechender Befähiger gesehen werden, um Montagehilfsmittel zu erzeugen und im weltweiten Produktionsnetzwerk zu verteilen.¹⁶

Eigene Untersuchungen der Anlauf Risiken bei einem deutschen Automobil-OEM zeigen, dass gerade bei kurzfristigen Produktdesignänderungen ein erhöhtes Risiko besteht, die Ziele im Anlauf durch nicht pünktlich oder fehlerhaft bereitgestellte Betriebsmittel zu verfehlen. Fehlerhaft bereitgestellte Vorrichtungen und die dann notwendigen Nacharbeiten können ein Verzögerungsrisiko von bis zu 6 Wochen bedeuten. Damit zählen fehlerhafte Betriebsmittel zu den Anlauf Risiken mit mittlerem bis hohem Verzögerungsausmaß. Circa ein Drittel der befragten Stakeholder der Anlauforganisation nannte dieses Risiko als eine der bedeutendsten Verzögerungsursachen im Anlauf.¹⁷ Dies ist konsistent mit den Ergebnissen von ABULAWI, die für den Gesamtdurchlauf ab den initialen Planungsschritten einer baukastenbasierten Prototypenvorrichtung für den Karosseriebau 24 Wochen ermittelt hat.¹⁸ Nicht nur im Anlauf gehören Betriebsmittel wie Vorrichtungen somit zu den Montagefaktoren, die nach J. WAGNER U. A. zur Vermeidung von Störungen oder Minderung ihrer Auswirkungen von Bedeutung sind.¹⁹ Somit bestehen die folgenden zentralen Herausforderungen:

- Sicherstellung einer schnellen Betriebsmittelbereitstellung in einem globalen Produktionsnetzwerk für einen breiten Modellmix.
- Schnelle Anpassbarkeit bestehender Betriebsmittel bei Produktneueinführungen oder -änderungen.
- Sicherstellung hochwertiger Betriebsmittel für reproduzierbare Erzeugnisse innerhalb der gesetzten Fertigungstoleranzen.

Vor diesem Hintergrund werden in Praxis und Wissenschaft Konzepte für automatisiert gestaltete Vorrichtungen diskutiert und teilweise eingeführt.²⁰ Diese entsprechenden Ansätze werden in den Kapiteln 2 und 3 im Detail erläutert, bevor auf Basis des damit geschaffenen Verständnisses für Theorie- und Praxisdefizit ein Lösungsvorschlag hergeleitet wird.

¹⁴ Vgl. I. Göpfert, Schulz und Wellbrock, „Trends in der Automobillogistik“, 2013, S. 15 und Schellhas, „Die Kaluga-Rundlaufverkehre der DB Schenker AG – ein innovatives Praxisbeispiel für die Materialversorgung des Volkswagen-Werkes im russischen Kaluga“, 2013, S. 265.

¹⁵ Vgl. E. Abele, *Handbuch globale Produktion*, 2006.

¹⁶ Vgl. Pfeffer, „Von Rapid Prototyping zur Serienfertigung – 3D-Druck von Heute“, 2017, S. 2.

¹⁷ Siehe Abschnitt 2.2.1 für eine vertiefte Darstellung. Im Rahmen der Vorstudie wurden zwei Neufahrzeugprojekte im Bereich der Motorendmontage untersucht. Für Bewertung und Absicherung wurden 19 leitfadengestützte Experteninterviews mit Stakeholdern aus Anlauforganisation, Produktion und Entwicklung durchgeführt.

¹⁸ Vgl. Abulawi, „Ansatz zur Beherrschung der Komplexität von vernetzten 3D-CAD-Modellen“, 2012, S. 38.

¹⁹ Vgl. J. Wagner u. a., „Störungsrelevante Montageprozesse erkennen“, 2015, S. 2

²⁰ Vgl. Horst Witte Gerätebau Barskamp KG, *Modulare Spannsysteme*, 2015, S. 238.

1.2 Ziel der Arbeit

Wie oben dargestellt sind Betriebsmittel wie Vorrichtungen ein kritischer Faktor für eine störungsfreie und damit effiziente Montage. Für einen besseren Umgang mit Störungen und eine schnelle Anpassbarkeit bzw. Änderbarkeit von Vorrichtungen wird in diesem Werk ein Ansatz zur Automatisierung der Vorrichtungsgestaltung vorgestellt, um so einen Beitrag für einen effizienten Anlauf bzw. die schnelle Rekonfigurierbarkeit von Montagesystemen der Automobilindustrie zu leisten. Bestehende Ansätze zur Automatisierung der Vorrichtungsgestaltung sind nur bedingt anwendbar. Zum einen verlieren sich die vielfältigen Ansätze im Forschungsfeld des Computer-Aided Fixture Design (CAFD) in der Optimierung von Teilfragestellungen. Andere Ansätze aus dem Bereich des Model-Based System Engineering (MBSE) sind bislang nicht auf Parameter-Level vorgedungen (siehe Abschnitte 2.3 und 3.4). Somit wird das Ziel dieses Werks wie folgt formuliert:

Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Entwicklung eines Gestaltungsmodells für die Betriebsmittelgestaltung, mittels derer Werkstückmodelle automatisiert in Vorrichtungsmodelle überführt werden.

Dafür werden ein Beschreibungsmodell für Montagevorrichtungen sowie ein Erklärungsmodell auf Basis der Wirkzusammenhänge zwischen den in den Teilmodellen des Beschreibungsmodells enthaltenen Parametern entwickelt. Durch die Kenntnis des Zielzustands, der in Form von in der Vorrichtung umzusetzenden Funktionen und Anforderungen besteht, entsteht auf diese Weise ein Gestaltungsmodell für die Vorrichtungsentstehung. Damit stellt das hier verfolgte Vorgehen, das die Paradigmen des MBSE aufgreift, eine Abkehr von vielen Werken der CAFD-Forschung dar; denn nicht eine Teilaufgabe, wie z. B. die Spannplanentwicklung, soll durch eine Automatisierungslösung optimiert werden – vielmehr soll durch die Betrachtung und Modellierung des Gesamtprozesses ein Beitrag für eine durchgängige Automatisierung der Betriebsmittelgestaltungsprozesse geleistet werden.

Der Lösungsansatz ist das in diesem Vorhaben beschriebene Konzept für eine automatisierte Gestaltung von Betriebsmitteln der Montage wie Vorrichtungen oder Ladungsträgern, das den Spezialisierungsgrad von den sogenannten Spezialvorrichtungen mit den Kostenvorteilen von Baukastenvorrichtungen über den Einsatz von additiv gefertigten Schnittstellenelementen und einem Baukastenansatz vereinigt. Hardware-seitig besteht das hier vorgestellte Vorhaben in einer Bauweise für Vorrichtungen für die Montage, die eine Automatisierung der Gestaltungsprozesse von den zugrunde liegenden Vorrichtungen ermöglicht. Software-seitig soll dies durch eine Automatisierungslösung in Form eines Software-Demonstrators umgesetzt werden, in dem eine durchgängige Automatisierung des Betriebsmittelgestaltungsprozesses implementiert ist.

Die Neuartigkeit des in diesem Werk präsentierten Ansatzes besteht dabei darin, dass aufbauend auf den MBSE-Grundgedanken vernetzter Teilmodelle die Transformation der Eingangsinformationen aus Werkstück und Montageprozess in die Ausgangsinformationen, insbesondere die Vorrichtungsgestalt, auf Parameterlevel dargestellt wird – dies wurde bislang weder in der CAFD- noch in der MBSE-Forschung gezeigt.²¹

²¹ Vgl. Katzwinkel u. a., „MBSE on parameter level“, 2018.

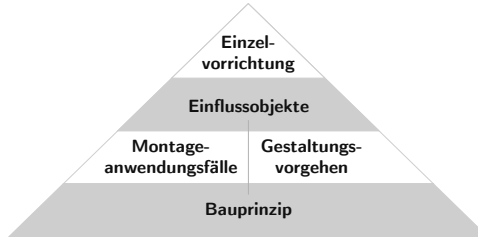


Abb. 1.1: Objektbezogener Untersuchungsbereich

1.3 Abgrenzung des Untersuchungsbereichs

Die oben bereits mehrfach herangezogenen Betriebsmittel- wie auch Vorrichtungsbegriffe sind für sich genommen sehr weit gefasst. Bei der Betriebsmittelenstehung wie auch im Betriebsmittelbau interagieren diverse Beteiligte an verschiedensten Schnittstellen miteinander, wie auch Betriebsmittel im Einsatz diverse Schnittstellen zu Prozessen und Objekten aufweisen. Daher erfolgt in diesem Abschnitt eine Bestimmung des Untersuchungsbereichs.

Das Untersuchungsobjekt im Zentrum dieser Arbeit ist aus praktischer Perspektive die zu erzeugende Einzelvorrichtung für einen beliebigen Vormontage-Anwendungsfall der Automobilindustrie (siehe Abbildung 1.1).²² Auf diese wirken diverse Einflüsse, wie das auf der Vorrichtung zu be- oder verarbeitenden Werkstücks, die durchzuführenden Montageoperationen oder involvierte Werkzeuge. Eingegrenzt wird die Gestaltung der Vorrichtung durch das im weiteren Verlauf der Arbeit beschriebene Bauprinzip, das auf einem Baukasten sowie additiv hergestellten Elementen basiert. Dieses Bauprinzip ist so abgestimmt, dass gängige Anwendungsfälle von Montagevorrichtungen abgebildet werden können und die angestrebte, automatisierbare Gestaltungslogik befähigt wird.

Jeder Lösungsansatz, der den objektbezogenen Untersuchungsbereich beeinflusst oder verändert, hat zumindest mittelbar Auswirkungen auf die betroffene Prozesskette, insbesondere wenn Übergaben von Informationen und damit Ein- und Ausgänge in Teilprozesse betroffen sind. Insofern ist eine Eingrenzung des betrachteten Ausschnitts der Prozesskette und der betroffenen Schnittstellen von Bedeutung.

Der für dieses Werk relevante, in Abbildung 1.2 dargestellte Prozessausschnitt ist Teil der Arbeitsvorbereitung, die in Abstimmung mit der Produktgestaltung Arbeitspläne erzeugt. Diese beinhalten u. a. den Betriebsmittelbedarf, aus dem wiederum die Notwendigkeit entstehen kann, Betriebsmittel bzw. Vorrichtungen neu zu gestalten und aufzubauen. Der Vorrichtungsplaner plant und konstruiert in dieser Phase die Vorrichtung, die anschließend auf Basis der Planungsvorgaben im Vorrichtungsbau realisiert wird. Dieser Prozess – und damit der Aufgabenbereich des Vorrichtungsplaners – liegt im Fokus dieses Werks. Als weiterer Adressatenkreis sind daneben die Methodenplaner betroffen. Unter dieser Gruppe werden all diejenigen Stakeholder zusammengefasst, die die beschriebenen Prozesse gestalten. Diese Methodenplaner sind somit für die Einführung der Konzepte dieses Werks verantwortlich und insofern ergibt sich auch aus dieser Perspektive die An-

²² Eine genaue Eingrenzung der betrachteten Anwendungsfälle erfolgt auf Basis der verschiedenen Anforderungsprofile in Abschnitt 4.3.1.

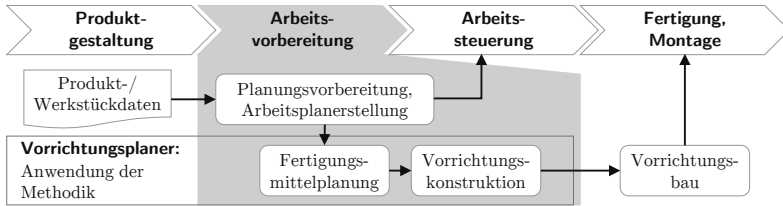


Abb. 1.2: Prozess- und subjektbezogener Untersuchungsbereich²³

forderung an eine Beschreibung der Ergebnisse, sodass diese implementier- und damit nutzbar werden. Innerhalb des so für das Betrachtungsobjekt *Vorrichtung* beschriebenen Untersuchungsbereichs ergibt sich so die nachfolgend eingeführte Forschungsfrage.

Lassen sich Vorrichtungen durch in Software implementierbare, automatisierbare Gestaltungsprozesse aus Werkstückdaten ableiten?

Für die Beantwortung dieser Forschungsfrage sind die folgenden Unterfragen zu beantworten:

- Wie ist ein Vorrichtungsbaukasten zu gestalten, um Gestaltungsprozesse algorithmisch in Software umsetzen zu können?
- Welche Gestaltungsmodelle sind für einen automatisierten Gestaltungsprozess zu definieren und wie lassen sich diese formal beschreiben?
- Wie kann eine durchgängige Verknüpfung der Eingangs- mit den Ausgangsparametern erreicht werden?

1.4 Aufbau der Arbeit

Mit der oben dargestellten Zielsetzung, die in einem Gestaltungsmodell für die automatisierte Gestaltung von Betriebsmitteln besteht, widmet sich die vorliegende Arbeit einer Fragestellung aus der Ingenieurspraxis. Demzufolge ist die Arbeit den Technikwissenschaften zuzuordnen, die durch die ACATECH wie folgt zusammengefasst werden: „Technikwissenschaften schaffen kognitive Voraussetzungen für Innovation in der Technik und Anwendung technischen Wissens und legen die Grundlagen für die Reflektion ihrer Implikationen und Folgen.“²⁴ Diesem Anspruch versucht dieses Werk gerecht zu werden, indem der Erkenntnisgewinn in Form einer modellbasierten Beschreibung der Zusammenhänge im Vorrichtungswesen in eine anwendbare Methodik überführt und in einen Demonstrator zur Überprüfung der Erkenntnisse eingebracht wird.

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich am Forschungsansatz für die angewandten Wissenschaften nach ULRICH.²⁵ Dieser ist geeignet, da der Praxisbezug bzw. die Anwendung

²³ In Anlehnung an Franzkoviak, „Methodik zur Strukturierung von Vorrichtungssystemen in der Lohnfertigung“, 2014, S. 6.

²⁴ Kornwachs u. a., *Technikwissenschaften*, 2013, S. 8.

²⁵ Vgl. Ulrich, „Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft“, 1981, S. 19.

und damit eine der wesentlichen Anforderungen an die Technikwissenschaften (s.o.) eine zentrale Stellung im Vorgehen einnehmen. Ausgangspunkt für die Untersuchungen ist demnach die Analyse der Praxis und die Ableitung eines Praxisdefizits. Anschließend erfolgt aufbauend auf die Betrachtung der Theoriezusammenhänge die zentrale Modellbildung sowie Handlungsempfehlungen, die durch eine Anwendung in der Praxis überprüft werden. Abbildung 1.3 zeigt die grundsätzliche Struktur der Arbeit und den Bezug zum Forschungsansatz nach ULRICH.²⁶

Abb. 1.3: Struktur der Arbeit²⁷

In Kapitel 2 werden die Grundlagen des Betriebsmittelwesens und Vorrichtungsbaus erläutert. Dabei wird insbesondere darauf eingegangen, welche Funktionen von Vorrichtungen übernommen werden. Außerdem wird dargestellt, wie Vorrichtungen heute gestaltet werden und welche Stakeholder welche Aufgaben an den Schnittstellen übernehmen. Schließlich werden Rationalisierungsansätze im Vorrichtungswesen dargestellt, die Eingang in die betriebliche Praxis gefunden haben, bevor die Herausforderungen aus der Praxis aus den dargestellten Inhalten abgeleitet werden.

In Kapitel 3 werden die Defizite in theoretischer Hinsicht hergeleitet. Dazu wird zunächst der Forschungsbereich Model-Based System Engineering (MBSE) dargestellt. Nach einer Auseinandersetzung mit der Modelltheorie wird aufgezeigt, in welchen Paradigmen

²⁶ Vgl. Ulrich, *Management*, 1984, S. 192.

²⁷ In Anlehnung an ebd., 1984, S. 192.

sich die modellbasierten Ansätze im MBSE von den konventionellen Entwicklungsansätzen unterscheiden. Anschließend erfolgt eine Analyse des Forschungsfelds Computer-Aided Fixture Design (CAFD) mit besonderer Berücksichtigung der Ansätze, die eine durchgängige Automatisierung der Vorrichtungsgestaltung zum Ziel haben.

In Kapitel 4 erfolgt anschließend die Herleitung des zentralen Lösungsansatzes und seiner wesentlichen Elemente. Dabei werden typische Anforderungen an Vorrichtungen erläutert und hypothesenartig dargestellt, dass die anforderungsbezogenen Parameter in eine zu erzeugende Vorrichtungsstruktur übersetzt werden können.

In Kapitel 5 werden die zentralen, beschreibenden Modelle für die automatisierte Vorrichtungsgestaltung dargestellt. Anschließend werden die zentralen Befähiger für den Gestaltungsansatz aufgezeigt, die im Sinne von Randbedingungen die Automatisierung der Gestaltungsprozesse unterstützen. Schließlich wird auf die Verkettung der Modelle eingegangen, sodass ein übergeordnetes Wirkmodell entsteht.

In Kapitel 6 erfolgt abschließend die Darstellung verschiedener Anwendungsbeispiele von Vorrichtungen, die mittels eines Demonstrators automatisiert erzeugt wurden. Aufbauend auf den anhand dieser Beispiele gewonnenen Erkenntnissen erfolgt abschließend die kritische Reflexion der Ergebnisse der Arbeit.

Schließlich werden in Kapitel 7 die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Diese werden zudem hinsichtlich der oben genannten Anforderungen aus den Technikwissenschaften beurteilt und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.