HELMUT SCHMIDT UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg

Ermittlung von Änderungsbedarfen und -möglichkeiten an automatisierten Fertigungssystemen auf Basis von Fähigkeits- und Abhängigkeitsmodellen

Von der Fakultät für Maschinenbau

der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades einer/eines Doktor-Ingenieurin/Doktor-Ingenieurs

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Xuan-Luu Hoang, M. Sc.

aus Tien-Ninh

Hamburg 2020

Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay
	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg
Tag der mündlichen Prüfung:	22.09.2020

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, der ich zwischen August 2015 und September 2019 nachging.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing Alexander Fay, der es mir ermöglichte an seiner Professur als wissenschaftlicher Mitarbeiter forschend im Bereich der Automatisierungstechnik tätig zu sein und mir auch stets mit seiner Fachkenntnis und methodischen Herangehensweise zur Seite stand. Sein Rat sowie die Förderung und Forderung durch ihn waren nicht nur wesentlich für den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit, sondern haben mich auch für meinen weiteren beruflichen Werdegang in hohem Maße geprägt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich danke ich nicht nur für das entgegengebrachte Interesse und die Begutachtung meiner Arbeit, sondern auch für die mit Herrn Prof. Dr.-Ing Alexander Fay gemeinsam durchgeführte Betreuung des DFG-Forschungsprojektes „FlexA“.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ebenfalls möchte ich Herrn Philipp Marks meinen herzlichen Dank für die angenehme Zusammenarbeit am Forschungsprojekt sowie für den anregenden wissenschaftlichen und sozialen Austausch aussprechen.

Mein aufrichtiger Dank geht zudem an Herrn Rolf Bense sowie an die Unternehmen, die mir es ermöglicht haben meine erarbeiteten Inhalte an indsutriellen Fertigungssystemen zu validieren.

Ein äußerst großer Dank gilt allen Kollegen des Instituts für Automatisierungstechnik, die mich im Laufe meiner Zeit am Institut mit ihrer fachlichen Kompetenz und guten Anregungen enorm unterstützt haben. An den starken Teamzusammenhalt, die Hilfsbereitschaft und die spaßigen Mittagspausen sowie sozialen Events werde ich mich immer dankbar zurückerinnern. An dieser Stelle möchte ich Herrn Dr.-Ing. Jan Ladiges, Herrn Henry Bloch, Herrn Feras El Sakka und Herrn Alaettin Dogan mit besonderem Dank hervorheben. Durch ihre kritischen Reviews, Korrekturen sowie wertvollen Denkanstöße haben sie maßgeblich zur erfolgreichen Vollendung der vorliegenden Arbeit beigetragen. Des Weiteren möchte ich Herrn Dr.-Ing. Esteban Arroyo herzlichst danken, der mich bereits bei meiner Masterarbeit als Betreuer und später ebenfalls als Arbeitskollege stets mit seinem fachlichen Rat unterstützt hat.

Insbesondere bedanke ich mich bei Eileen Stickens. In den stressigen und schwierigen Zeiten war sie stets eine wichtige Stütze für mich. Ihre Geduld, Fürsorge und Ermutigungen haben wesentlich dazu beigetragen, dass ich die Strapazen und Herausforderungen der letzten Jahre bewältigen konnte.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich sehr für ihre bedingungslose Unterstützung und ihr Verständnis. Sie haben mir die notwendige Motivation, Rückhalt sowie Kraft in den schwierigen Zeiten gegeben, sodass ich diese Arbeit erfolgreich abschließen konnte.

Braunschweig, September 2020 Luu Hoang

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abkürzungsverzeichnis IV

1 Einleitung 1

1.1 Motivation und Hintergrund 1

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit 2

2 Grundlagen und Eingrenzung der Arbeit 5

2.1 Begriffsbestimmung und erste Eingrenzung des Untersuchungsbereichs 5

2.2 Ursachen für technische Änderungen an automatisierten Fertigungssystemen 7

2.2.1 Einflussfaktoren und Gründe von technischen Änderungen 7

2.2.2 Einordnung der Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit 9

2.3 Charakteristika von technischen Änderungen an automatisierten Fertigungssystemen 12

2.3.1 Kategorien von technischen Änderungen an automatisierten Fertigungssystemen 12

2.3.2 Prozessphasen von technischen Änderungen an Fertigungssystemen 15

2.3.3 Zusammenhang zwischen technischen Änderungen und Design-Paradigmen 16

2.4 Weitere Eingrenzung des Untersuchungsbereichs und Detaillierung der Forschungsfrage 18

2.5 Anforderungen an den zu erarbeitenden Lösungsansatz 19

3 Objekte von automatisierten Fertigungssystemen und Abhängigkeiten zwischen diesen 23

3.1 Objekte und Aufbau von automatisierten Fertigungssystemen 23

3.1.1 Objekttypen und deren Zusammenhänge 23

3.1.2 Komponenten und Aufbau von technischen Ressourcen 26

3.2 Abhängigkeiten zwischen den Objekten automatisierter Fertigungssysteme 27

3.2.1 Abhängigkeiten zwischen Produkt, Information, Energie und Prozess 27

3.2.2 Abhängigkeiten zwischen Prozessen sowie zwischen Prozess und Ressource 28

3.2.3 Abhängigkeiten zwischen und innerhalb technischer Ressourcen 29

4 Stand der Forschung und industrielle Praxis 32

4.1 Industrielle Praxis 32

4.2 Ansätze zur Ermittlung des technischen Änderungsbedarfs 33

4.2.1 Prozessbasierte Fähigkeitsmodellierungsansätze 34

4.2.2 Rein merkmalbasierter Ansatz zur Änderungsbedarfsermittlung von Karl 36

4.2.3 Kritische Bewertung der Ansätze zur Änderungsbedarfsermittlung 37

4.3 Ansätze zur Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten 40

4.3.1 Komponentenbasierte Ansätze 41

4.3.2 Merkmalbasierte Ansätze 42

4.3.3 Kritische Bewertung der vorgestellten Ansätze ... 43
4.4 Ableitung des Handlungsbedarfs ... 46
5 Überblick über den Ansatz und Vorstellung des laufenden Beispiels ... 48
5.1 Allgemeiner Aufbau des Ansatzes ... 48
5.2 Vorstellung des laufenden Beispiels ... 49
6 Fähigkeitsmodellierung für die Ermittlung des Änderungsbedarfs ... 51
6.1 Modellierungskonzept der Fähigkeiten von automatisierten Fertigungssystemen ... 51
6.1.1 Grundlegendes Modellierungskonzept für Fähigkeiten von Fertigungssystemen ... 51
6.1.2 Komposition und Dekomposition von Fähigkeiten ... 55
6.2 Beschreibungsmittel zur Abbildung der Fähigkeitsmodellierung ... 62
6.2.1 Formalisierte Prozessbeschreibung (FPB) ... 62
6.2.2 System Modeling Language (SysML) ... 63
6.2.3 Automation Markup Language (AML) ... 64
6.2.4 Web Ontology Language (OWL) ... 65
6.3 Auswahl eines geeigneten Beschreibungsmittels ... 65
6.4 Darstellung der Fähigkeitsmodellierung ... 67
7 Abhängigkeitsmodellierung für die Änderungsmöglichkeitsgenerierung ... 70
7.1 Modellierungskonzept für Objektabhängigkeiten ... 70
7.2 Beschreibungsmittel zur Abbildung der Abhängigkeitsmodellierung ... 74
7.2.1 Multiple-Domain Matrix ... 74
7.2.2 Zusicherungsdiagramm ... 76
7.2.3 Automation Markup Language ... 77
7.2.4 Web Ontology Language ... 78
7.3 Auswahl eines geeigneten Beschreibungsmittels ... 79
7.4 Darstellung der Abhängigkeitsmodellierung ... 80
8 Methoden für die Ermittlung von Änderungsbedarfen und –möglichkeiten von technischen Änderungen ... 85
8.1 Methode zur Ermittlung des Bedarfs von technischen Änderungen ... 85
8.1.1 Methode zur Änderungsbedarfsermittlung bei neuen bzw. veränderten Produkten ... 85
8.1.2 Methode zur Änderungsbedarfsermittlung bei der Kombination von Fähigkeiten ... 91
8.2 Methode zur Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten ... 94
9 Validierung der entwickelten Modelle und Methoden ... 101
9.1 Fallstudie 1: Hochspannungsprüfmaschine ... 101
9.1.1 Erstellung der Fähigkeitsmodelle ... 102
9.1.2 Erstellung der Abhängigkeitsmodelle ... 104

9.1.3 Anwendung der entwickelten Methoden und Experteninterview 104
9.2 Fallstudie 2: Automatisierte Zigarettenmaschine 111
9.3 Fallstudie 3: Automatisiertes Nietsystem 117
10 Kritische Beurteilung der entwickelten Modelle und Methoden 126
11 Zusammenfassung und Ausblick 133
11.1 Zusammenfassung 133
11.2 Ausblick 134
Literaturverzeichnis 137
Referenzierte Literatur 137
Referenzierte Normen und Richtlinien 146
Referenzierte Internetquellen 147
Veröffentlichungen des Verfassers 147
Studentische Arbeiten 147
Anhang A: Modelle der Fallstudie 1 148
Anhang B: Analyseergebnisse der Fallstudie 1 151
Anhang C: Modelle der Fallstudie 2 154
Anhang D: Modelle der Fallstudie 3 156

Abkürzungsverzeichnis

AML	Automation Markup Language
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CAEX	Computer-Aided Engineering Exchange
CSV	Comma-Separated Values
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
EC	Engineering Change
FPB	Formalisierten Prozessbeschreibung
HMI	Human-Machine Interface
MC	Manufacturing Change
MDM	Multiple Domain Matrix
OWL	Web Ontology Language
PPR-Konzept	Produkt-Prozess-Ressource-Konzept
SPARQL	SPARQL Protocol and RDF Query Language
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SVG	Scalable Vector Graphics
SysML	Systems Modeling Language
UML	Unified Modeling Language
XMI	Extensible Markup Language Metadata Interchange
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

1.1 Motivation und Hintergrund

Das aktuelle Produktionsumfeld vieler Unternehmen ist durch eine zunehmende Dynamik gekennzeichnet, in welchem sich Anforderungen an die Produktion rasch ändern können [EME+17]. Diese zunehmende Dynamik des Produktionsumfelds führt dazu, dass produzierende Unternehmen und deren Produktionssysteme sich schnell an die wechselnden Anforderungen anpassen müssen, um weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben [PLE17]. Diese wechselnden Anforderungen können dabei verschiedene Ursachen haben. Beispielsweise kann eine Anforderung aus neuen Kundenwünschen oder geänderten rechtlichen Auflagen resultieren. In der Praxis werden Produktionssysteme jedoch meist für ein bestimmtes Produktionsumfeld mit konkreten Anforderungen entwickelt [LHS+12]. Wenn das Produktionsumfeld und die Anforderungen sich jedoch nach der Entwicklung des Produktionssystems ändern, führt dies dazu, dass technische Änderungen am Produktionssystem benötigt werden, um die geänderten Anforderungen zu erfüllen [BBR18]. Andernfalls würden die bestehenden Produktionssysteme obsolet werden, könnten nicht weiter in der Produktion eingesetzt werden und müssten durch ein neuerworbenes Produktionssystem ersetzt werden. Aufgrund der hohen Investitionskosten von Produktionssystemen ist diese Option aus wirtschaftlicher Sicht für Unternehmen nicht immer sinnvoll [KAR14]. Die zunehmende Dynamik des Produktionsumfelds führt hierbei dazu, dass Produktionssysteme in ihrem Lebenszyklus häufiger technische Änderungen durchlaufen müssen [KBR19]. Berücksichtigt man zudem, dass die Betriebsphasen von Produktionssystemen branchenabhängig mehrere Jahre oder Jahrzehnte betragen, sind technische Änderungen während der Betriebsphase eines Produktionssystems keine Seltenheit, sondern können häufig auftreten [LAD18].

Gründe für die zunehmende Dynamik des Produktionsumfelds und dementsprechend für das erhöhte Aufkommen von technischen Änderungen an Produktionssystemen sind hierbei verschiedene Trends [KBR19]. Zwei dieser Trends sind die Individualisierung von Produkten sowie der verkürzte Produktlebenszyklus. Diese Trends führen dazu, dass vermehrt neue Produktvarianten und Produktfamilien im Laufe des Lebenszyklus des Produktionssystems eingeführt werden, wodurch häufig technische Änderungen notwendig werden, da neue Anforderungen an das Produktionssystem gestellt werden [BESÄ10]. Ein weiterer Trend in diesem Zusammenhang ist die immer schnellere Entwicklung von neuen Technologien [ABRE11]. Hierbei werden durch das Aufkommen der Technologien neue Produkte und ebenfalls neue Produktionsprozesse ermöglicht, die beide zu technischen Änderungen am Produktionssystem führen können [SCH18].

Dementsprechend ist es nicht verwunderlich, dass verschiedene Studien ergeben haben, dass die Thematik der technischen Änderung in der Industrie immer mehr an Bedeutung gewinnt [HYM03; KBH+15]. Des Weiteren ergab eine Studie bezüglich des Änderungsmanagements [LWM+12], dass technische Änderungen bereits im Jahr 2012 einen signifikanten Anteil der gesamten Forschungs- und Entwicklungskapazität deutscher Unternehmen einnahmen. In der Studie [KOHO16] aus dem Jahre 2015 gaben 38 Prozent der beteiligten Unternehmen an, dass sie im Jahr über 500 technische Änderungen hinsichtlich ihrer Produktion durchführen. Darüber hinaus bewerteten 67 Prozent der befragten Unternehmen der Studie den systematischen Umgang mit technischen Änderungen als bedeutend oder sehr bedeutend. Mit Hinblick auf die zukünftige Entwicklung in den nächsten fünf bis zehn Jahren stuften sogar 93 Prozent der befragten Unternehmen den systematischen Umgang mit technischen Änderungen als bedeutend oder sehr bedeutend ein.

Anhand der Studien ist ersichtlich, dass die Thematik der technischen Änderungen durchaus Relevanz für die Industrie besitzt. Aufgrund eines hohen Termindrucks werden in der Praxis technische Änderungen an Produktionssystemen häufig unsystematisch durchgeführt [KIE07]. In der Praxis wurden in der Vergangenheit bereits verschiedene Anstrengungen unternommen, um das Management der technischen Änderungen zu systematisieren [KOC17]. Die technische Änderung selbst geschieht jedoch meist ohne methodische Unterstützung, obwohl die technische Änderung von Produktionssystemen eine äußerst anspruchsvolle Aufgabe ist [PLE17]. Hierbei stellt die hohe Heterogenität von technischen Änderungen in der Produktion, die beispielsweise die Ergänzung, Ersetzung oder Entfernung von physischen oder softwaretechnischen Ressourcen, Technologien oder Personal umfasst, eine große Herausforderung dar [KBR19]. Außerdem müssen häufig relevante Informationen innerhalb und zwischen verschiedenen Gewerken, wie beispielsweise dem Gewerk der Mechanik und der Elektrotechnik, ermittelt und analysiert werden [GSG+09]. Bei automatisierten Produktionssystemen muss außerdem das Gewerk des Software-Engineerings betrachtet werden, welches die Systemkomplexität nochmals steigert. Hinzu kommt, dass die Gewerke verschiedene Engineering-Dokumente und Software-Tools nutzen, was die Kommunikation zwischen den Gewerken erschwert [SZH+13]. Aufgrund dieser Aspekte sind die Ergebnisse der technischen Änderungen in der Praxis häufig fehlerbehaftet und hängen stark vom individuellen Wissen der Ingenieure ab [KAR14; PLE17]. Dementsprechend kann geschlussfolgert werden, dass Ingenieure in der Praxis methodische Unterstützung bei der Durchführung von technischen Änderungsprozessen benötigen, um die Aufgabe besser bewältigen zu können.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Wie im vorherigen Unterkapitel beschrieben, wird ein methodischer Ansatz benötigt, der Ingenieure bei technischen Änderungsprozessen an Produktionssystemen unterstützt. Ein solcher Ansatz sollte Ingenieuren dabei helfen die oben beschriebenen Defizite bei technischen Änderungen in der Praxis zu beheben. Dementsprechend sollte ein solcher Ansatz die Heterogenität der vorliegenden Informationen sowie die Komplexität der Produktionssysteme berücksichtigen. Eine bewährte Möglichkeit dies zu erreichen stellen modellbasierte Ansätze dar, durch welche ein systematisches Engineering und eine begleitende Validierung der Engineering-Ergebnisse ermöglicht wird [WALÖ10]. Des Weiteren sollte der methodische Ansatz ebenfalls automatisiert durchführbar sein, um eine gewisse Mindestqualität der Änderungsergebnisse zu gewährleisten und das beschriebene Defizit bezüglich der starken Abhängigkeit vom individuellen Wissen der Ingenieure zu beheben. Infolgedessen wird die zentrale Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit wie folgt formuliert:

Kann die Ermittlung von technischen Änderungsbedarfen und -möglichkeiten an Produktionssystemen mithilfe eines modellbasierten Ansatzes nutzenstiftend automatisiert werden, um Ingenieure bei Änderungsprojekten zu unterstützen?

Entsprechend dieser Forschungsfrage ist das Ziel dieser Arbeit, die Entwicklung geeigneter Modelle und Methoden, die eine automatisierte Analyse der bestehenden Limitationen und möglichen Änderungsauswirkungen von Produktionssystemen ermöglichen.

Um das deklarierte Ziel zu erreichen, werden im Anschluss an die Einleitung in Kapitel 2 zunächst die notwendigen Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit geschaffen. Aufgrund der Vielfältigkeit von Produktionssystemen und technischen Änderungsmöglichkeiten findet im Rahmen des Kapitels 2 ebenfalls eine Eingrenzung des Untersuchungsbereiches statt. Hierbei wird der Untersuchungsbereich

u.a. auf Fertigungssysteme begrenzt und die zentrale Forschungsfrage weiter detailliert. Darüber hinaus werden im Kapitel 2 die Herausforderungen von technischen Änderungen genauer aufgezeigt und Anforderungen an den zu entwickelnden modellbasierten Ansatz erhoben.

Im darauffolgenden Kapitel 3 wird das in der Arbeit vorherrschende Verständnis von Fertigungssystemen vorgestellt. Hierbei werden die verschiedenen Objekte eines Fertigungssystems sowie deren Abhängigkeiten beschrieben und erläutert. Diese Erläuterungen helfen dabei, ein besseres Verständnis für die nachfolgenden entwickelten Modelle und Methoden zu erhalten

In Kapitel 4 wird zu Beginn auf die industrielle Praxis bezüglich technischer Änderungen eingegangen. Anschließend werden relevante bestehende Ansätze aus der Forschung vorgestellt und anhand der erhobenen Anforderungen bewertet. Auf Basis dieser Bewertung wird am Ende des Kapitels 4 der Handlungsbedarf der vorliegenden Arbeit hergeleitet.

In Kapitel 5 wird ein Überblick über den entwickelten Ansatz gegeben sowie das laufende Beispiel der Arbeit vorgestellt, anhand dessen der entwickelte Ansatz in den jeweiligen Kapiteln veranschaulicht wird.

In Kapitel 6 wird das erstellte Fähigkeitsmodellierungskonzept für Fertigungssysteme präsentiert, welches dafür genutzt wird, um technische Änderungsbedarfe zu ermitteln. Neben dem Fähigkeitsmodellierungskonzept werden ebenfalls verschiedene Beschreibungsmittel vorgestellt, die potentiell für die Abbildung des Modells geeignet sind. Auf Basis von verschiedenen Bewertungskriterien wird anschließend das geeignetste Beschreibungsmittel für die Abbildung der Fähigkeit ausgewählt. Am Ende des Kapitels wird die Abbildung der Fähigkeit mit dem ausgewählten Beschreibungsmittel erläutert.

In analoger Struktur zu Kapitel 6 wird in Kapitel 7 das entwickelte Abhängigkeitsmodell eingeführt, welches dafür verwendet wird, technische Änderungsmöglichkeiten zu bestimmen. Dementsprechend wird in Kapitel 7 das Abhängigkeitsmodellierungskonzept präsentiert sowie potentielle Beschreibungsmittel für die Abbildung vorgestellt. Anschließend erfolgen auf Basis von erhobenen Bewertungskriterien die Auswahl des geeignetsten Beschreibungsmittels sowie die Erläuterung der Abbildung des Abhängigkeitsmodellierungskonzepts mittels des ausgewählten Beschreibungsmittels.

In Kapitel 8 werden die entwickelten Methoden vorgestellt, die auf Basis der beschriebenen Modelle den Änderungsbedarf sowie die technischen Änderungsmöglichkeiten automatisiert ermitteln.

Kapitel 9 beschreibt die Durchführung und Ergebnisse dreier Fallstudien mit jeweils industriellen Fertigungssystemen, in denen die beschriebenen Modelle und Methoden validiert wurden.

Im anschließenden Kapitel 10 werden die entwickelten Modelle und Methoden kritisch bewertet. Dies erfolgt einerseits auf Basis der in Kapitel 2 erhobenen Anforderungen und anderseits anhand von theoretischen Überlegungen und den Erkenntnissen aus den zuvor durchgeführten Fallstudien.

Das abschließende Kapitel 11 fasst die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf die Optimierungsmöglichkeiten der entwickelten Modelle und Methoden sowie weiterführende Forschungsbedarfe hinsichtlich der technischen Änderungen von Fertigungssystemen.

Die erarbeiteten Inhalte dieser Arbeit entstanden u.a. im Rahmen des DFG-Projekts „FlexA“, welches in Kooperation mit der Universität Stuttgart durchgeführt wurde. Im Rahmen des Projekts wurden Auszüge der Inhalte dieser Arbeit in gemeinsamen Veröffentlichungen publiziert, siehe beispielsweise [HFM+17#] und [MHW+18]. Der Fokus der Arbeiten der Universität Stuttgart lag dabei auf der Konzipierung eines agentenbasierten Assistenzsystems, welches auf Basis der erarbeiteten Modelle und

Methoden der vorliegenden Arbeit Modernisierungsvorschläge generiert. Das Konzept für das agentenbasierte Assistenzsystem wurde von Philipp Marks erarbeitet und in [MWH+17] veröffentlicht.

2 Grundlagen und Eingrenzung der Arbeit

In diesem Kapitel wird zunächst der Änderungsbegriff im Zusammenhang mit dem Produktionsumfeld erläutert. Basierend darauf findet anschließend eine erste Eingrenzung des Untersuchungsbereichs dieser Arbeit statt (Unterkapitel 2.1). Des Weiteren gibt das Kapitel einen Überblick über die Ursachen für technische Änderungen und stellt den Zusammenhang zu den Begriffen der Flexibilität sowie Wandlungsfähigkeit her (Unterkapitel 2.2). Anschließend werden verschiedene Charakteristika von technischen Änderungen an automatisierten Fertigungssystemen beschriebenen (Unterkapitel 2.3). Anhand der beschriebenen Charakteristika wird der Untersuchungsbereich der Arbeit im Anschluss weiter eingegrenzt sowie die Forschungsfrage der Arbeit weiter detailliert (Unterkapitel 2.4). Abschließend beschreibt das Kapitel die unterschiedlichen Herausforderungen bei der Ermittlung und Analyse von technischen Änderungen, woraus dann Anforderungen an den zu entwickelnden Lösungsansatz hergeleitet werden (Unterkapitel 2.5).

2.1 Begriffsbestimmung und erste Eingrenzung des Untersuchungsbereichs

Der Begriff der Änderung besitzt eine Vielfalt an Ausprägungen und wird in unterschiedlichsten Zusammenhängen angewandt. Im Kontext der Produktion wird der Änderungsbegriff mehrdeutig verwendet und kann sich auf Änderungen an der Organisation, am technischen Produkt oder am technischen Produktionsprozess und dessen Ressourcen beziehen [KÖH09]. Häufig werden Änderungen in diesem Kontext auch als Modifikationen, Modernisierung, Adaptionen oder Rekonfigurationen bezeichnet [KOC17]. Änderungen bezüglich der Organisation sind unternehmensbezogen und befassen sich hauptsächlich mit der Anpassung des Ablaufs von Geschäftsprozessen oder der Unternehmensstruktur [KLE99]. Solche Änderungen können unter anderem strategische und strukturelle Aspekte sowie auch Werte und Überzeugungen eines Unternehmens umfassen [DOLA09]. Änderungen, die das Produkt oder den Produktionsprozess betreffen, werden im deutschsprachigen Raum häufig zusammen als technische Änderungen bezeichnet. In der Fachliteratur gibt es verschiedene Definitionen für den Begriff der technischen Änderung, die meist nur leicht voneinander abweichen. Lindemann und Reichwald definieren technische Änderungen als nachträgliche Änderungen von bereits freigegebenen Arbeitsergebnissen von technischen Produkten [LIRE98]. Eine ähnliche Definition des Begriffs wird in [GIL13] verwendet. Dort werden technische Änderungen definiert als alle nachträglichen Änderungen von verbindlich festgelegten technischen Dokumenten oder Datenbasen, einschließlich der dazugehörigen Produkt- und Prozessänderungen, die den Absatz eines Produktes oder die Erhöhung des Umsatzes gewährleisten oder verbessern [GIL13]. In der englischsprachigen Fachliteratur werden technische Änderungen am Produkt und technische Änderungen am technischen Produktionsprozess sowie deren Ressourcen begrifflich unterschieden. Erstere Änderungen werden als *Engineering Change* (EC) bezeichnet, wohingegen letztere Änderungen unter dem Begriff *Manufacturing Change* (MC) zusammengefasst werden [KMM+14].

In den letzten Jahrzehnten wurden in der Fachliteratur diverse unterschiedliche Definitionen von EC veröffentlicht, siehe beispielsweise [CON97], [LMB08] und [HAM13]. Basierend auf einer fundierten Analyse von bestehenden Definitionen, wurde in [JEC+11] folgende Definition für den EC-Begriff vorgestellt:

Ein Engineering Change ist eine technische Änderung an Teilen, Zeichnungen oder Software, die bereits während des Produktdesignprozesses freigegeben wurden. Ein Engineering Change kann von

beliebiger Größe oder Art sein sowie eine beliebige Anzahl von Personen umfassen und beliebig lange dauern.

Diese Definition des EC-Begriffs ist in der Forschung weit anerkannt und wird auch im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet [CCW17].

Im Gegensatz zum EC-Begriff ist der MC-Begriff noch relativ neu und wurde Anfang des Jahrtausends in der Fachliteratur erstmalig verwendet, obwohl diese Art der technischen Änderung bereits schon über Jahrzehnte praktiziert wird [STI08]. Trotz der hohen Relevanz von technischen Änderungen am technischen Prozess sowie dessen Ressourcen gibt es keine einheitliche Definition des MC-Begriffs. Eine der wenigen Quellen, die eine dedizierte Definition des MC-Begriffs bereitstellt, ist [KOC17]. Darin wird der MC-Begriff wie folgt definiert:

Ein Manufacturing Change ist eine technische Änderung eines Produktionssystems oder seiner Elemente, die für den Betrieb freigegeben wurden oder sich bereits in Betrieb befinden. Ein Manufacturing Change kann von beliebiger Größe oder Art sein sowie eine beliebige Anzahl von Personen umfassen und von beliebiger Dauer sein.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird das Verständnis des MC-Begriffs nach [KOC17] verwendet. EC und MC sind eng miteinander verknüpft. Die Zusammenhänge zwischen EC und MC sind schematisch in Abbildung 2-1 dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass eine Änderungsursache zu technischen Änderungen am Produkt oder an der technischen Ressource führen kann. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die Produkte von den technischen Ressourcen über einen technischen Prozess hergestellt werden. Dementsprechend können MCs Auswirkungen auf das Produkt haben und zu dessen Änderung führen. Umgekehrt können Änderungen am Produkt auch zu MCs führen. Infolgedessen kann es ebenfalls zu einem Informationsaustausch zwischen den Aktivitäten der technischen Änderung des Produktionssystems und des Produkts kommen, um die möglichen Wechselwirkungen der jeweiligen Änderung zu ermitteln. In Abbildung 2-1 ist des Weiteren angedeutet, dass die Aktivitäten der Änderungsarten durch ein jeweiliges Änderungsmanagement koordiniert werden. Das Änderungsmanagement ist dabei für die Organisation sowie Kontrolle des jeweiligen Änderungsprozesses zuständig [JEC+11; KMM+14]. Für die Aktivitäten des EC übernimmt dies das Engineering Change Management (ECM). Die Koordination der Aktivitäten des MC übernimmt hingegen das Manufacturing Change Management (MCM). Aufgrund der zeitlichen Entwicklung, der ähnlichen Zielsetzung sowie Rahmenbedingungen von EC und MC basieren viele entwickelte Konzepte und Methoden für MC auf Konzepten und Methoden, die ursprünglich für das EC entwickelt wurden. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf technischen Änderungen, die unter dem Begriff des Manufacturing Change fallen.

Produktionssysteme können in Systeme unterschieden werden, die entweder für die verfahrenstechnische Produktion oder für die Fertigung diskreter Stückgüter genutzt werden [BESÄ10]. Produktionssysteme, die zur erstgenannten Gruppe gehören, werden in dieser Arbeit als verfahrenstechnische Produktionssysteme bezeichnet. Produktionssysteme der zweitgenannten Gruppe werden in dieser Arbeit als Fertigungssysteme bezeichnet. Verfahrenstechnische Produktionssysteme können hierbei Fließ- oder Chargen-Prozesse ausführen, um Produkte herzustellen [SCGR08]. Fertigungssysteme hingegen führen für die Produktion Prozesse aus, die den Zustand und/oder die räumliche Position einzelner identifizierbare Stücke verändern [ZÖR88]. Zwischen verfahrenstechnischen Produktionssystemen und Fertigungssystemen bestehen hierbei gravierende Unterschiede bezüglich des Engineerings und ihrer Leittechnik [BMQ+10; ECK15]. Aufgrund dieser Unterschiede beschränkt sich der Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit auf automatisierte Fertigungssysteme. In Anbetracht der

engen Zusammenhänge und Gemeinsamkeiten zwischen MC und EC werden in dieser Arbeit auch bestimmte Aspekte von EC betrachtet und analysiert, insofern sie Relevanz für Änderungen am technischen Produktionsprozess sowie dessen Ressourcen besitzen. Änderungen an der Organisation von Produktionsunternehmen sind kein Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit, da diese keine technischen Änderungen sind.

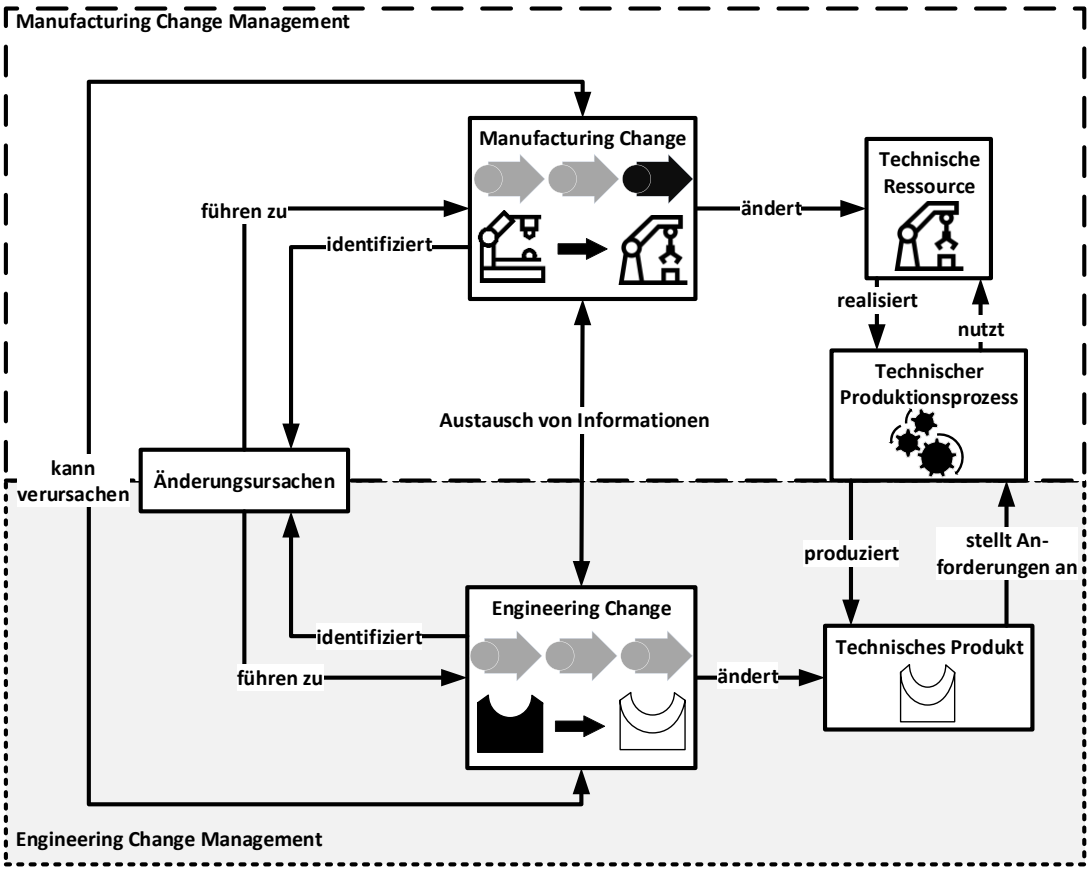

Abbildung 2-1: Zusammenhänge zwischen MC, MCM, EC und ECM nach [Koc17]

2.2 Ursachen für technische Änderungen an automatisierten Fertigungssystemen

Um ein besseres Verständnis für die Notwendigkeit von technischen Änderungen zu erhalten, werden in diesem Unterkapitel die Einflussfaktoren sowie Gründe für technische Änderungen beschrieben. Hierfür werden verschiedene Quellen aus der Fachliteratur herangezogen, die dieses Thema aus unterschiedlichen Blickwinkeln untersucht haben. Darüber hinaus werden anschließend die Begriffe der Flexibilität und der Wandlungsfähigkeit von Fertigungssystemen definiert und erläutert, inwiefern sie einen Einfluss auf das Auftreten von technischen Änderungen haben.

2.2.1 Einflussfaktoren und Gründe von technischen Änderungen

Aufgrund der fortschreitenden Globalisierung und der stetig steigenden Dynamik des Marktes befinden sich produzierende Unternehmen zunehmend in einem unsicheren Umfeld mit erhöhtem Wettbewerb, indem beispielsweise Marktbedingungen sowie Kundenanforderungen starken Schwankungen unterliegen [SJF11]. Ein solches Umfeld führt häufig dazu, dass Produktionssysteme technischen Änderungen unterzogen werden müssen, um auf die unterschiedlichen Schwankungen zu reagieren.

Hierbei gibt es eine Vielzahl an Einflussfaktoren, die zu technischen Änderungen an Produktionssystemen auf verschiedenen Ebenen führen können. In der Fachliteratur werden die Einflussfaktoren von technischen Änderungen eines Produktionssystems auch als Wandlungstreiber oder turbulente Umwelt bezeichnet [KOC17].

In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl an Arbeiten veröffentlicht, die darauf abzielten die verschiedenen Einflussfaktoren von technischen Änderungen zu identifizieren und zu untersuchen [GIL13]. Beispielsweise führen Westkämper und Zahn in ihrer Arbeit unter anderem Produkte, Märkte, Wettbewerber, Mitarbeiter, Gesetze, Kapitalmärkte, Maschinen, Betriebsmittel, Prozesse, technische Innovationen und Management als Wandlungstreiber auf [WEZA09]. Karl et al. führten eine Studie durch zur Ermittlung von Einflussfaktoren mit Fokus auf Änderungen von Betriebsmitteln. In der Studie wurden fünfzehn Einflussfaktoren, wie beispielsweise Absatzzahlen, Produktionstechnologie, Wettbewerb und Qualifikation der Mitarbeiter, ermittelt und zusätzlich in zyklischen bzw. nicht-zyklischen sowie in unternehmensinternen bzw. unternehmensexternen Ursprung unterschieden [KPS11]. Laut der Studie besitzen insbesondere nicht-zyklische und unternehmensinterne Einflussfaktoren eine höhere Relevanz für die Änderung von Betriebsmitteln. Koch et al. unterteilen Einflussfaktoren von technischen Änderungen aufbauend auf einer umfangreichen Literaturrecherche in die Bereiche Fertigung (*Manufacturing*), allgemeines Auftreten (*General Occurances*) und Produktengineering (*Engineering*) [KMR16]. Zu den Einflussfaktoren aus dem Bereich der Fertigung zählen die Autoren hierbei den Fabriklebenszyklus, andere *Manufacturing Changes*, die weitere technische Änderungen zur Folge haben können, sowie Komplikationen, die sich z.B. aus der Fertigungsplanung oder aus dem Fertigungsprozess ergeben. Einflussfaktoren, die die Autoren in den Bereich Allgemeines Auftreten einordnen, waren hierbei Gesetze und Vorschriften, neue Technologien, Änderungen bezüglich der Lieferkette, der kontinuierliche Verbesserungsprozess (Kaizen) sowie die unternehmensinternen Zielsetzungen. Koch et al. benennen als Einflussfaktoren aus dem Bereich Produktengineering den Produktlebenszyklus, andere *Engineering Changes*, die weitere technische Änderungen zur Folge haben können, sowie Produktfehler [KMR16].

Viele Autoren unterteilen Einflussfaktoren von technischen Änderungen in unternehmensinterne und unternehmensexterne Faktoren [PAC12]. Eine häufig zitierte Arbeit in diesem Zusammenhang stammt von Wiendahl et al. [WEN+07]. In ihrer Arbeit führen die Autoren soziale Faktoren, politische Faktoren, Umweltfaktoren, ökonomische Faktoren und marktbedingte Faktoren als unternehmensexterne Einflussfaktoren auf. Als unternehmensinterne Einflussfaktoren für technische Änderungen werden personalbezogene Faktoren, produkt- und technologiebezogene Faktoren, strukturbezogene Faktoren sowie methodenbezogene Faktoren genannt. Eine weitere Arbeit, die diese Einteilung der Einflussfaktoren nutzt, stammt von Heinen et al. In ihrer Arbeit benennen die Autoren fünf Einflussbereiche, aus denen externe Wandlungstreiber entstehen können und erwähnen zudem, dass es auch interne Wandlungstreiber gibt, die innerhalb eines Produktionssystems entstehen und zu Änderungen führen können, ohne sie jedoch weiter zu spezifizieren [HRW10]. Als Einflussbereiche werden hierbei Technologie, Umwelt, Politik, Gesellschaft und Ökonomie genannt. Pachow-Frauenhofer ordnet externe Einflussfaktoren auch in fünf Kategorien ein, die sich jedoch leicht von den Einflussbereichen von Heinen et al. unterscheiden, und benennt als interne Einflussfaktoren Prozess, Organisation, Ressource sowie Mensch [PAC12]. In der Arbeit von Pachow-Frauenhofer werden als Kategorien von externen Einflussfaktoren Ökonomie (z.B. Globalisierung), Gesellschaft (z.B. individualisierte Kundenwünsche), Politik (z.B. Deregulierung), Ökologie (z.B. Ressourcenverknappung) und Markt (z.B. kürzerer Produktlebenszyklus) genannt. Laut einer Unternehmensstudie des Sonderforschungsbereichs 467 „Wandlungsfä-

hige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion" der Deutschen Forschungsgemeinschaft treten unternehmensexterne Einflussfaktoren häufiger auf als unternehmensinterne Einflussfaktoren und besitzen zudem einen stärkeren Einfluss auf technische Änderungen [WEZA09]. Die Studie sagt zudem aus, dass die Anzahl sowie die Intensität der Einflussfaktoren von der Branche abhängen [KWW03]. In der Studie wurde jedoch keine Aussage über die Anzahl und Intensität der Einflussfaktoren in der Fertigungsbranche gemacht.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass in der Fachliteratur eine hohe Anzahl an unterschiedlichen Einflussfaktoren sowie Einteilungen der Faktoren ermittelt wurden. Für produzierende Unternehmen, die sich in einem turbulenten Umfeld befinden, besteht die Herausforderung darin die unterschiedlichen Einflussfaktoren zu beobachten und gegebenenfalls durch gezielte technische Änderungen auf geänderte Faktoren zu reagieren, unter der Beachtung von wirtschaftlichen sowie technischen Rahmenbedingungen. In diesem Zusammenhang sind die Flexibilität sowie Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen wichtige Aspekte. Diese Eigenschaften ermöglichen eine schnelle Anpassung von Produktionssystemen an geänderte Anforderungen und tragen dementsprechend dazu bei, dass die Systeme in einem turbulenten Umfeld wettbewerbsfähig bleiben können. Aufgrund dessen werden die Begriffe *Flexibilität* und *Wandlungsfähigkeit* im nächsten Unterkapitel kurz erläutert und im Kontext der technischen Änderung eingeordnet.

2.2.2 Einordnung der Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

Erste wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit dem Begriff der Flexibilität auseinandergesetzt haben, entstanden bereits Mitte des vergangenen Jahrhunderts. In den nachfolgenden Jahrzehnten gewann die Thematik stetig an Bedeutung, was durch die steigende Anzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen erkennbar ist [MPG14]. Dementsprechend existiert heute eine Vielzahl von Arbeiten, die die Flexibilität aus verschiedenen Perspektiven analysiert haben. Diese Arbeiten befassten sich beispielsweise mit der Flexibilität aus Sicht der Ökonomie, der Unternehmensorganisation oder der Produktion [SESE90]. Aufgrund der unterschiedlichen Sichtweisen und Fokussierungen gibt es bislang in der Fachliteratur keine einheitliche, allgemeingültige Definition des Flexibilitätsbegriffs [MYW18]. Selbst innerhalb der Produktionsdomäne gibt es keine einheitliche Definition für den Begriff der Flexibilität aufgrund der Vielfältigkeit an Produktionssystemen und den unterschiedlichen Betrachtungsmöglichkeiten dieser Systeme im Hinblick auf ihre Flexibilität [WWB+14]. Aus diesem Grund wird in der Fachliteratur die Flexibilität eines Produktionssystems durch Teilflexibilitäten charakterisiert, um eine differenzierte Betrachtung der Flexibilität zu ermöglichen. In [SESE90] werden basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche elf Teilflexibilitäten definiert, die die Flexibilität eines Fertigungssystems aus unterschiedlichen Blickwinkeln beschreiben. Des Weiteren werden die Teilflexibilitäten in die drei Kategorien Basisflexibilität, Systemflexibilität sowie aggregierte Flexibilität eingeordnet. Hierbei beeinflussen Teilflexibilitäten der Kategorie Basisflexibilität die Teilflexibilitäten aus der Kategorie Systemflexibilität. Diese Teilflexibilitäten wirken sich wiederum auf die Teilflexibilitäten der Kategorie aggregierte Flexibilität aus. Die elf Teilflexibilitäten sowie deren Kategorien sind in Tabelle 2-1 aufgeführt. Viele Arbeiten, die sich mit der Fertigungsflexibilität befassen, nutzen oder beziehen sich auf diese definierten Teilflexibilitäten von Sethi und Sethi [LFH+13]. Dementsprechend repräsentiert diese Beschreibung eine weitverbreitete und akzeptierte Definition des Flexibilitätsbegriffs bezüglich Fertigungssystemen.

Tabelle 2-1 Teilflexibilitäten nach [SESE90]

Teilflexibilität	Beschreibung	Kategorie
Maschinenflexibilität (Machine flexibility)	Beschreibt die Operationsvielfalt einer Fertigungsmaschine, die ohne größeren Aufwand wie Umrüstarbeiten umgesetzt werden kann.	Basisflexibilität
Materialflussflexibilität (Material handling flexibility)	Beschreibt die Fähigkeit eines Fertigungssystems verschiedenartige Werkstücke effizient und auf verschiedenen Wegen durch das System zu transportieren.	Basisflexibilität
Arbeitsplanflexibilität (Operation flexibility)	Beschreibt die unterschiedlichen Möglichkeiten ein Produkt durch verschiedene Arbeitspläne zu fertigen.	Basisflexibilität
Prozessflexibilität (Process flexibility)	Beschreibt die Fähigkeit eines Fertigungssystems unterschiedliche Produkte herzustellen, ohne größere Änderungen vorzunehmen.	Systemflexibilität
Prozessfolgeflexibilität (Routing flexibility)	Beschreibt die Fähigkeit eines Fertigungssystems Produkte auf alternativen Wegen durch das System zu fertigen.	Systemflexibilität
Produktmixflexibilität (Product flexibility)	Beschreibt die Fähigkeit eines Fertigungssystems neue Produkte zu fertigen bzw. bestehende Produkte zu ersetzen.	Systemflexibilität
Mengenflexibilität (Volume flexibility)	Beschreibt die Fähigkeit eines Fertigungssystems bei unterschiedlichen Auslastungen profitabel zu produzieren.	Systemflexibilität
Erweiterungsflexibilität (Expansion flexibility)	Beschreibt die Leichtigkeit eines Fertigungssystems seine Produktionskapazität und Fähigkeiten zu erhöhen.	Systemflexibilität
Programmflexibilität (Program flexibility)	Beschreibt die Fähigkeit eines Fertigungssystems über einen Zeitraum ohne Wartungs- und Reparaturarbeiten zu produzieren.	Aggregierte Flexibilität
Produktionsflexibilität (Production flexibility)	Beschreibt die Anzahl an verschiedene Produkttypen, die ein Fertigungssystem mit kleinen Umrüstvorgängen fertigen kann.	Aggregierte Flexibilität
Marktflexibilität (Market flexibility)	Beschreibt die Leichtigkeit, mit der sich das Fertigungssystem an ein sich veränderndes Marktumfeld anpassen kann.	Aggregierte Flexibilität

Der Begriff der Wandlungsfähigkeit steht im engen Zusammenhang mit dem Flexibilitätsbegriff. Die Wandlungsfähigkeit erlaubt es, Fertigungssysteme durch strukturelle Änderung der physischen oder softwaretechnischen Komponenten an veränderte Anforderungen anzupassen [NRA08]. In Abgrenzung dazu ermöglicht die Flexibilität Fertigungssystemen innerhalb der bestehenden Systemstruktur auf veränderte Anforderungen zu reagieren [WIE02]. Abbildung 2-2 nach [VDI 5201] stellt die Unterschiede sowie Zusammenhänge zwischen der Wandlungsfähigkeit und Flexibilität in der Produktionsdomäne dar. Wie in der Abbildung zu erkennen, wird die Flexibilität eines Produktionssystems als Korridore von Kennzahlen während eines gewissen Beobachtungszeitraums beschrieben. Binnen der

Bandbreite dieser Korridore können die Systeme die Ausprägungen der Kennzahlen anpassen, ohne eine Änderung der Systemstruktur vorzunehmen. Der Flexibilitätsbegriff nach [VDI 5201] kann hierbei auch mit den Definitionen der Teilflexibilitäten nach [SeSe90] verbunden werden, indem die Flexibilitäten der Kennzahlen eines Systems zusammengefasst werden, um eine Teilflexibilität nach [SeSe90] zu beschreiben. Die Wandlungsfähigkeit hingegen wird beschrieben als die Änderung des Referenzwertes des Flexibilitätskorridors relativ zum benötigten Wandlungszeitraum. Die Referenzwertänderung wird hierbei durch eine technische Änderung des Systems herbeigeführt. Die Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems ist umso höher, je signifikanter die Änderung des Flexibilitätsreferenzwertes und je geringer der dafür benötigte Wandlungszeitraum ist.

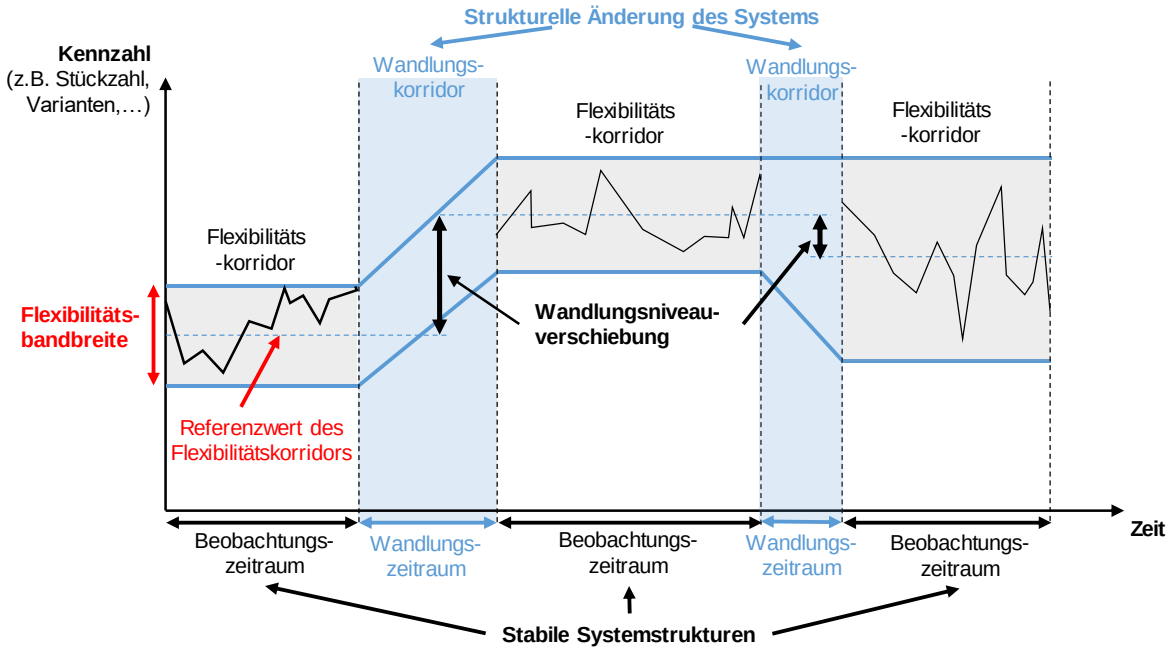

Abbildung 2-2: Beziehung zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit nach [VDI 5201]

Neben den Begriffen der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit existieren noch weitere Begriffe, die häufig in einem ähnlichen Kontext genutzt werden, wie beispielsweise die Begriffe Parametrierung und Rekonfiguration. Im Rahmen dieser Arbeit wird unter dem Begriff der Parametrierung eine Art der Änderung verstanden, die eine Veränderung der aktuellen Ausprägung einer Kennzahl innerhalb eines bestehenden Flexibilitätskorridors herbeiführt. Dies bedeutet, dass die Parametrierung keine Änderungen an der Struktur des Systems herbeiführt. Dementsprechend ist die Parametrierung eine Möglichkeit die vorhandene Flexibilität eines Produktionssystems zu nutzen. Die Rekonfiguration eines Produktionssystems wird hierbei als eine technische Änderung betrachtet, die die Struktur eines Systems ändert und dadurch die Änderung eines Flexibilitätsreferenzwertes und/oder der Bandbreite eines Flexibilitätskorridors bewirkt.

Anhand der vorherigen Ausführungen kann abgeleitet werden, dass die Flexibilität sowie Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems in einer engen Wechselbeziehung mit technischen Änderungen stehen. Hierbei hat die Flexibilität eines Produktionssystems einen Einfluss auf den Bedarf nach technischen Änderungen. Beispielsweise benötigt ein Produktionssystem erst eine technische Änderung, wenn die aktuelle Flexibilität als nicht ausreichend erachtet wird. Dementsprechend werden technische Änderungen meist ausgeführt, um den Referenzwert des Flexibilitätskorridors zu ändern und/o-

der die Bandbreite des Flexibilitätskorridors zu erhöhen. Die Wandlungsfähigkeit des Systems wiederum hat einen wesentlichen Einfluss auf den Aufwand einer technischen Änderung. Technische Änderungen können darüber hinaus auch dafür verwendet werden, um die Wandlungsfähigkeit eines Systems zu ändern. Hierbei können technische Änderungen genutzt werden, um beispielsweise die Modularität eines Produktionssystems zu erhöhen, wodurch die Wandlungsfähigkeit verbessert wird.

2.3 Charakteristika von technischen Änderungen an automatisierten Fertigungssystemen

Im Folgenden werden drei verschiedene Kategorisierungsmöglichkeiten aus der Fachliteratur beschrieben, um technische Änderungen besser einordnen und unterscheiden zu können. Des Weiteren werden unterschiedliche Einteilungen der Prozessphasen für den technischen Änderungsprozess aus dem Bereich der Fabrikplanung und den Änderungsprozess von EC beschrieben und erläutert. In diesem Zusammenhang wird auch der Referenzprozess für MC diskutiert. Anhand der beschriebenen Kategorien sowie des Änderungsprozesses wird in Unterkapitel 2.4 der Untersuchungsbereich dieser Arbeit weiter eingegrenzt. Am Ende dieses Unterkapitels wird zudem noch der Zusammenhang zwischen verschiedenen Design-Paradigmen für flexible und wandlungsfähige Produktionssysteme aus der Forschung und dem Bedarf an MC beschrieben. Dabei wird u.a. erläutert, inwiefern die Produktionssysteme, die nach diesen Paradigmen konstruiert werden, trotzdem technische Änderungen benötigen, um in einem dynamischen Umfeld bestehen zu können.

2.3.1 Kategorien von technischen Änderungen an automatisierten Fertigungssystemen

Technische Änderungen können hinsichtlich diverser Aspekte in unterschiedliche Kategorien unterteilt werden [EWS97]. Die Rahmenbedingungen und Eigenschaften von technischen Änderungen sowie deren Auswirkungen auf das zu ändernde System können sich hierbei stark zwischen den Kategorien unterscheiden. Dementsprechend hilft eine kategorische Einordnung von technischen Änderungen bei der Eingrenzung des Untersuchungsbereiches. Basierend darauf kann eine zielgerichtete Ermittlung der Rahmenbedingungen für die Analyse von technischen Änderungen erfolgen. In der Fachliteratur gibt es diverse Arbeiten, die verschiedene Kategorisierungsmöglichkeiten von technischen Änderungen vorstellen [GIL13]. Im Folgenden werden die Kategorisierung nach den Lebenszyklusphasen, den Systemebenen sowie den zu ändernden Fähigkeitsarten vorgestellt und diskutiert. Die ersten beiden Kategorisierungen sind in der Fachliteratur weitverbreitet und werden häufig genutzt um technische Änderungen einzuordnen [GIL13]. Mithilfe der letzten Kategorisierung können technische Änderungen anhand ihrer Auswirkungen auf die Fähigkeiten eines Systems eingeordnet werden. Dies hilft insbesondere bei der Analyse von technischen Änderungen, die das Ziel haben die Systemfähigkeit anzupassen.

Kategorisierung nach Lebenszyklusphasen

In Bezug auf MC stellen die Lebenszyklusphasen, in der sich die zu ändernden Fertigungssysteme befinden, wichtige Kategorien dar, um technische Änderungen einzuordnen [BEL08]. In [ECW+09] wurden fünf Lebenszyklusphasen eines technischen Produkts definiert, um ECs anhand ihrer Auftrittszeitpunkte zu kategorisieren. Obwohl diese Kategorisierung ursprünglich für EC entwickelt wurde, ist sie auch auf MC anwendbar, da Fertigungssysteme und technische Produkte bezüglich des Lebenszyklusmanagements sehr ähnlich sind [KGR16]. Hierbei wird zwischen den Phasen Vorentwurf, Entwurf, Herstellung, Betrieb und Entsorgung unterschieden, wobei die Entwurfsphase in die drei Unterphasen Konzeptentwurf, Ausgestaltung und Detailentwurf unterteilt wird (siehe Abbildung 2-3).

Abbildung 2-3: Lebenszyklusphasen eines technischen Produkts nach [ECW+09]

Neben dieser Unterteilung wurden in der Fachliteratur noch diverse andere Unterteilungen der Lebenszyklusphasen vorgestellt, beispielsweise in [ERA+06] oder [CON97], jedoch unterscheiden sich diese meist nur geringfügig voneinander. Technische Änderungen in den jeweiligen Phasen unterscheiden sich häufig in ihren Ursachen [ECZ04]. Beispielweise können technische Änderungen in der Betriebsphase daraus resultieren, dass Erweiterungen des Produkts notwendig sind, um neuen Anforderungen gerecht zu werden. Des Weiteren unterscheiden sich die technischen Änderungen zwischen den Phasen in ihrer Auftrittshäufigkeit sowie in ihren Umsetzungsaufwänden [BEL08].

In Zusammenhang mit den Lebenszyklusphasen wurde beobachtet, dass die Auftrittshäufigkeit von technischen Änderungen in frühen Lebenszyklusphasen höher ist als in späten Lebenszyklusphasen, wohingegen der Umsetzungsaufwand mit Fortschreiten der Lebenszyklusphase zunimmt. Grund hierfür ist, dass in den frühen Lebenszyklusphasen die Anforderungen an das zu entwickelnde Fertigungssystem zumeist noch nicht vollständig spezifiziert bzw. bekannt sind und dementsprechend noch häufig erweitert und angepasst werden. Technische Änderungen in diesem Stadium sind erfahrungsmäßig weniger aufwändig, da das System physisch größtenteils noch nicht besteht und die Änderungen sich deshalb nur auf technische Dokumente beziehen. Im Vergleich dazu haben technische Änderungen, die in späteren Lebenszyklusphasen durchgeführt werden, Auswirkungen auf das bestehende System und sind deshalb mit mehr Aufwand verbunden. Diese Änderungen betreffen dann meist die physische Ausstattung und die Steuerungssoftware des Systems sowie Änderungen in den dazugehörigen Dokumenten. [WIL06]

Kategorisierung nach Systemebene

Neben den unterschiedlichen Auftrittszeitpunkten entlang der Lebenszyklusphase eines Fertigungssystems können MCs auch in unterschiedlichen Systemebenen durchgeführt werden. Ein Produktionssystem kann hierbei Änderungen auf den Ebenen Netzwerk, Werk/Fabrik, Produktionslinie/-bereich, Maschine/Arbeitsstation oder Baugruppe erfahren [NRA08]. Abhängig von der Systemebene ändern sich hierbei die Betrachtungsobjekte und der Fokus des Ziels der technischen Änderungen.

Auf Netzwerkebene wird das System als ein Verbund aus verschiedenen Werken und Fabriken betrachtet. Technische Änderungen auf dieser Ebene betreffen in der Regel die technischen Aspekte der Logistik oder Supply Chain. Änderungen auf Netzwerkebene zielen meist darauf ab das System bezüglich der Beschaffungs- und Transportprozesse an geänderte Anforderungen anzupassen und zu optimieren [WEN+07]. In der darunterliegenden Werk-/Fabrikebene ist das zu betrachtende System ein einzelnes Werk bzw. eine einzelne Fabrik. Technische Änderungen auf dieser Ebene betreffen die Elemente innerhalb einer Fabrik sowie deren Verknüpfungen. Dies beinhaltet beispielsweise Änderungen am Fabriklayout, Änderungen an den Prozessabläufen zwischen Produktionslinien, Änderungen an der Intralogistik der Fabrik oder auch Einbindung von neuen Produktionslinien. Die Änderungen werden in der Regel durchgeführt, um das Werk/die Fabrik auf geänderte Anforderungen bezüglich der Produktion von Produktfamilien anzupassen [WIHE04]. Auf der Produktionslinienebene wird die Systemgrenze um die Maschinen und Arbeitsstationen einer Produktionslinie gezogen. Hierbei beinhalten technische Änderungen u.a. die Einführung von neuen Maschinen/Arbeitsstationen, die Änderung der Maschinen-

anordnung und Prozesssequenz, sowie Änderungen an den Transportvorgängen zwischen den Maschinen und Arbeitsstationen in einer Produktionslinie. Technische Änderungen auf Produktlinienebene beabsichtigen meist das System zu adaptieren, damit die Produktionslinie neuen Anforderungen hinsichtlich der Produktion von Baugruppen gerecht wird [WEN+07]. Technische Änderungen auf der Maschinen-/Arbeitsstationsebene befassen sich mit der Adaption von einzelnen Maschinen bzw. Arbeitsstationen. Die Änderungen zielen darauf ab eine Maschine bzw. Arbeitsstation dazu zu befähigen neue Anforderungen bezüglich der Fertigung von Werkstücken oder Unterbaugruppen eines Produkts zu erfüllen [WIHE04]. Technische Änderungen können beispielsweise die Integration von neuen Baugruppen sowie die Anpassung der Materialflussverbindungen innerhalb einer Maschine oder Arbeitsstation beinhalten. Hierbei betreffen die Änderungen die Hardware und/oder die Steuerungssoftware des Systems [LWA+13]. Auf Baugruppenebene zielen technische Änderungen darauf ab, Komponenten einer Baugruppe zu ändern, um den Teilprozess einer Maschine anzupassen. Diesbezüglich können technische Änderungen wie auf der vorangegangenen Ebene die Hardwarekomponenten sowie die Steuerungssoftware des zu ändernden Systems betreffen.

Kategorisierung nach zu ändernden Fähigkeitsarten

Neben den beiden vorangegangenen Kategorisierungen wird in dieser Arbeit noch eine weitere Kategorisierungsmöglichkeit betrachtet. Die Kategorisierung wurde erstmals in [HMW+16#] vorgestellt und ordnet technische Änderungen für Montage- und Handhabungsautomaten anhand der geänderten Fähigkeitsart in drei Kategorien ein. In der vorliegenden Arbeit wird diese Kategorisierung abgewandelt und für die Einordnung von technischen Änderungen an Fertigungssystemen genutzt. Hierbei werden folgende drei Kategorien verwendet:

- Anpassung der Merkmalausprägungen von vorhandenen Fertigungs- oder Materialflussfähigkeiten,
- Integration neuer Fertigungsfähigkeiten,
- Integration neuer Materialflussverbindungen.

Technische Änderungen in der ersten Kategorie zielen darauf ab, die bestehenden Merkmalausprägungen von vorhandenen Fertigungs- oder Materialflussfähigkeiten anzupassen. Ein Merkmal ist hierbei eine Eigenschaft eines Betrachtungsobjekts, welches zur Klassifizierung des Betrachtungsobjekts genutzt werden kann [HAD15]. Technische Änderungen in dieser Kategorie können bestehende Komponenten der Steuersoftware und/oder der physischen Struktur eines Systems betreffen. Die zweite Kategorie umfasst technische Änderungen, die das Ziel haben, neue Fertigungsfähigkeiten in ein Fertigungssystem zu integrieren. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen häufig zusätzliche Hardwarekomponenten hinzugefügt sowie Änderungen in der Steuerungssoftware vorgenommen werden. Bei technischen Änderungen dieser Kategorie müssen insbesondere Analysen bezüglich des Integrationsraumes, der technischen Schnittstellen der zu integrierenden Komponente und des Prozessablaufs erfolgen. Die technischen Änderungen in der letzten Kategorie befassen sich mit der Integration von neuen Materialflussverbindungen innerhalb eines Fertigungssystems, um neue Prozesssequenzen zu ermöglichen. Hierbei müssen die Steuerungssoftware sowie die physische Struktur des bestehenden Materialflusssystems analysiert werden, um die Ursachen von aktuellen Limitationen zu identifizieren und daraus möglichen Änderungen abzuleiten. Dementsprechend kann diese Art von technischen Änderungen Anpassungen der Materialflusssteuerungssoftware und/oder der physischen Struktur des Materialflusses beinhalten. Es ist anzumerken, dass es gewisse Abhängigkeiten zwischen den technischen

Änderungen der drei Kategorien geben kann. Beispielsweise kann die Integration einer neuen Fertigungsfähigkeit dazu führen, dass auch eine neue Materialflussverbindung hinzugefügt werden muss, um die neue Fertigungsfähigkeit nutzen zu können.

2.3.2 Prozessphasen von technischen Änderungen an Fertigungssystemen

In den Fachbereichen Fabrikplanung, Engineering Change sowie Manufacturing Change wurden diverse Einteilungen von Prozessphasen bezüglich technische Änderungen entwickelt und vorgestellt [KGR16]. Ein Großteil der Prozessphaseneinteilungen stammt hierbei aus den Bereichen der Fabrikplanung sowie des Engineering Change, da diese beiden Bereiche zeitlich vor dem Manufacturing Change entstanden sind.

Arbeiten aus dem Bereich der Fabrikplanung unterteilen den Prozess der technischen Änderungen in mindestens fünf Phasen. Diese Phasen sind Vorbereitung (*Preparation*), Grobplanung (*Rough Planning*), Detailplanung (*Detailed Planning*), Ausführungsplanung (*Implementation Planning*) sowie Ausführung (*Implementation*) [KGR16]. In der Vorbereitungsphase werden u.a. die Ziele der technischen Änderung festgelegt sowie unterschiedliche Analysen des Ist-Zustandes durchgeführt, um aufbauend darauf die weiteren Phasen zu bearbeiten. Die Grobplanungsphase umfasst die Erstellung von beispielsweise unterschiedlichen Produktionskonzepten, Produktionsabläufen und Fabriklayouts. In der darauffolgenden Detailplanungsphase stehen Aktivitäten im Fokus, die sich u.a. mit der Analyse und Bewertung der unterschiedlichen Produktionskonzepte sowie der Feinplanung des Produktions- und Lagerlayouts befassen. In der Ausführungsplanung werden verschiedene Maßnahmen bezüglich der Planung des Produktionsanlaufs, der Baustelle sowie des Umzugs von benötigten Betriebsmitteln und Arbeitsplänen getätigt. Anschließend erfolgten in der Ausführungsphase die Umsetzung, Abnahme sowie Inbetriebnahme der geplanten Konzepte. Arbeiten, die diese Phaseneinteilung nutzen, sind beispielsweise [FEL98] und [BER06]. In aktuelleren Arbeiten, wie beispielsweise in [VDI 5200] und [SCH13], wird nachträglich zu den fünf Phasen noch die Phase Wissensmanagement (*Knowledge Management*) betrachtet. Die Aktivitäten in dieser Phase zielen darauf ab die erworbenen Erkenntnisse aus den vorherigen Phasen für zukünftige technische Änderungen aufzubereiten und nutzbar zu machen.

Im Vergleich zur Fabrikplanung unterteilen Arbeiten, die sich mit EC befassen, den Prozess der technischen Änderungen primär in die vier Phasen Änderungsbedarfsermittlung (*Change Identification*), Lösungsfindung (*Solution Finding*), Bewertung und Entscheidung (*Evaluation & Decision*) und Implementierung (*Implementation*) [KOC17]. Hierbei werden in der ersten Phase die aktuellen Einschränkungen des Systems oder auch mögliche Verbesserungspotentiale identifiziert, die einen Änderungsbedarf auslösen können. In der darauffolgenden Lösungsfindungsphase wird das zu ändernde System zunächst bezüglich der ermittelten Änderungsbedarfe analysiert. Aufbauend auf den Analyseergebnissen werden anschließend mögliche Maßnahmen entwickelt, die zur Erfüllung des Änderungsbedarfs führen. In der dritten Phase wird eine Änderungsmaßnahme aus der Menge an zuvor entwickelten Maßnahmen hinsichtlich verschiedener Bewertungskriterien ausgewählt. Die Bewertungskriterien können dabei technische sowie wirtschaftliche Aspekte beinhalten. Die ausgewählte Änderungsmaßnahme wird in der darauffolgenden Implementierungsphase umgesetzt. Hierbei beinhaltet die Umsetzung nicht nur Änderungen am physischen System, sondern auch die Änderung von relevanten Dokumenten. Diese Einteilung des technischen Änderungsprozesses wird u.a. auch in [VDA 4965] vom Verband der Automobilindustrie als Referenzprozess für EC empfohlen. Einige Arbeiten, die sich ebenfalls mit EC befassen, z.B. [BEL08] und [WCB+15], unterteilen den Änderungsprozess zusätzlich noch in die Phasen Änderungsplanung (*Change Planning*) und Wissensmanagement (*Knowledge Management*). Erst-

genannte Phase ist hierbei der Implementierungsphase vorgelagert und beinhaltet Aktivitäten bezüglich der zeitlichen Planung, Beschaffung von benötigten Mitteln sowie der Überprüfung und Freigabe der umzusetzenden Maßnahme. Die Wissensmanagementphase ist der Implementierungsphase nachgelagert und dient, ähnlich wie im Bereich der Fabrikplanung, dazu, die erworbenen Erkenntnisse für künftige technische Änderungen zu sichern und verfügbar zu machen. Vereinzelte Arbeiten des EC betrachten zudem noch die Phase Ermittlung von latenten Änderungsbedarfen (*Latent Need for Change*), die der Änderungsbedarfsermittlungsphase noch vorgelagert ist [KGR16]. Diese Phase dient dazu frühzeitig zukünftige Änderungsbedarfe zu ermitteln und zu analysieren, um vor dem Auftreten der Änderungen bereits erste Abschätzungen machen zu können.

Aufgrund der hohen fachlichen Nähe zwischen dem EC und MC (siehe Unterkapitel 2.1) entspricht die Phaseneinteilung des technischen Änderungsprozesses für MC größtenteils den zuvor aufgeführten Phasen für EC. Der Großteil der Arbeiten in Zusammenhang mit MC unterteilt den technischen Änderungsprozess zusammenfassend in die gleichen sechs Phasen wie für EC, beginnend mit der Änderungsbedarfsphase (siehe Abbildung 2-4), wobei die Phase Änderungsplanung der Phase Implementierungsplanung entspricht [KOC17]. Die Aktivitäten in den jeweiligen Phasen sind hierbei fast identisch und unterscheiden sich lediglich hinsichtlich des Untersuchungsgegenstandes, was bei MC das Fertigungssystem ist, wohingegen bei EC das technische Produkt im Fokus des Änderungsprozesses steht. In [KGR16] wurde eine Analyse bezüglich der Phaseneinteilung von Änderungsprozessen aus den oben genannten Bereichen durchgeführt, um daraus eine Prozessphaseneinteilung für MC herzuleiten. Die hergeleitete Prozesseinteilung besteht dabei aus acht Phasen und ist eine Zusammenführung aller Phasen der Änderungsprozesse aus den betrachteten Bereichen. Diese Prozesseinteilung ist jedoch sehr kleinteilig, wodurch die acht Phasen teilweise schwer voneinander abgrenzbar sind. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher die in Abbildung 2-4 dargestellte Prozessphaseneinteilung verwendet, da diese Einteilung in der Literatur weiter verbreitet ist.

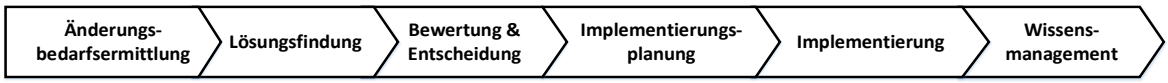

Abbildung 2-4: Prozessphaseneinteilung von technischen Änderungen für MCs [KOC17]

2.3.3 Zusammenhang zwischen technischen Änderungen und Design-Paradigmen

In der Vergangenheit gab es eine Vielzahl an Forschungsarbeiten, die sich mit Design-Paradigmen befasst haben, mit dem Ziel flexible und wandlungsfähige Produktionssysteme zu entwerfen. Die bekanntesten Paradigmen sind hierbei flexible Fertigungssysteme, rekonfigurierbare Fertigungssysteme, sowie evolvierbare Produktionssysteme. Im Folgenden werden diese Paradigmen kurz vorstellt und deren Zusammenhang zu technischen Änderungen erläutert.

Flexible Fertigungssysteme sind so ausgestaltet, dass die Fähigkeiten des Systems eine ausreichende Flexibilität besitzen, um eine vordefinierte Menge an Anforderungen zu erfüllen [ELM06]. Diese Menge kann dabei bestehende sowie zukünftige Anforderungen beinhalten. Automatisierte Fertigungssysteme, die für eine Umgebung entwickelt wurden, in der sich die Anforderungen häufig ändern, enthalten normalerweise mehrere zukünftige Anforderungen in der vordefinierten Menge. Hierdurch erhalten die Fertigungssysteme eine höhere Flexibilität und sind in der Lage, erwartete Änderungen bezüglich der Anforderungen zu bewältigen. Wenn jedoch Anforderungen nach der Entwicklungszeit des

Systems hinzukommen, die nicht in der vordefinierten Menge bereits vorhanden sind, muss die Flexibilität des Fertigungssystems nachträglich durch technische Änderungen erweitert werden, um die neuen Anforderungen zu erfüllen [JLL+12].

Im Vergleich zu den flexiblen Fertigungssystemen sind rekonfigurierbare Fertigungssysteme dafür ausgelegt die Fähigkeiten des Systems durch schnelle Konfigurationswechsel an die aktuellen Anforderungen anzupassen [KHJ+99]. Um dies zu erreichen, werden rekonfigurierbare Systeme mit sogenannten *Wandlungsbefähigern* konzipiert, wie Modularität und Kompatibilität [PAC12]. Beispielsweise besitzen solche Systeme standardisierte und funktionsfähige Einheiten oder Elemente sowie Schnellrüsteinrichtungen und Standardschnittstellen [ATSU12]. Aufgrund dieser Eigenschaften besitzen die rekonfigurierbaren Fertigungssysteme eine höhere Wandlungsfähigkeit im Vergleich zu den flexiblen Fertigungssystemen. Die Flexibilitätsbandbreite der jeweiligen Konfigurationen ist hierbei jedoch meist geringer als die der flexiblen Fertigungssysteme [ELM06]. Im Kontext der technischen Änderung ermöglichen rekonfigurierbare Fertigungssysteme insbesondere eine schnelle Implementierungsplanung und Implementierung, aufgrund ihrer höheren Wandlungsfähigkeit. Auf die verbleibenden Phasen des technischen Änderungsprozesses hat diese Art von Fertigungssystemen an sich keinen signifikanten Einfluss. Beispielsweise ist das Vorgehen in den ersten drei Phasen unabhängig von der Wandlungsfähigkeit des zu ändernden Systems. Bezüglich der Lösungsfindungsphase können rekonfigurierbare Systeme in Kombination mit Variabilitätsmanagementansätzen jedoch einen positiven Einfluss haben. Das Variabilitätsmanagement ist ein eigenes Forschungsgebiet und liegt nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit, weshalb an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen wird.

Ähnlich wie bei rekonfigurierbaren Fertigungssystemen, zielen evolvierbare Fertigungssysteme darauf ab durch Änderungen am System, sich an neue Anforderungen anzupassen. Im Unterschied zu rekonfigurierbaren Fertigungssystemen soll dies selbständig durch geringfügigere Änderungen über einen längeren Zeitraum erreicht werden, wodurch das System mit seiner Umwelt „evolviert“ [FBO07]. Um diese „Evolution“ zu ermöglichen, benötigen evolvierbare Fertigungssysteme ein hohes Maß an Modularität und Kompatibilität sowie einen intelligenten Steuerungsansatz, wie beispielsweise den Multiagentenansatz [RBP11]. In Bezug auf technische Änderungen bedeutet dies, dass das System selbstständig den Änderungsprozess für jede geringfügige Änderung durchläuft. Dementsprechend muss das System eine ausreichende Intelligenz und Fähigkeit besitzen, um selbst den Änderungsbedarf zu ermitteln sowie die nachgelagerten Prozessphasen durchzuführen. Aufgrund der Modularität und Kompatibilität von evolvierbaren Fertigungssystemen besitzen auch sie eine hohe Wandlungsfähigkeit, die die Implementierungsplanung sowie Implementierung begünstigt.

Auf Basis der vorherigen Ausführungen kann zusammengefasst werden, dass die entwickelten Design Paradigmen durchaus einen Einfluss auf den technischen Änderungsprozess haben. Hierbei versuchen flexible Fertigungssysteme durch eine zur Entwicklungszeit definierte Flexibilität den Bedarf an nachträglichen technischen Änderungen zu reduzieren. Jedoch können auch bei dieser Art von Fertigungssystemen, wie oben beschrieben, technische Änderungen notwendig werden. Im Gegensatz dazu sind technische Änderungen bei rekonfigurierbaren und evolvierenden Fertigungssystemen ein wichtiger Bestandteil der Design-Paradigmen, um sich an geänderte Anforderungen anzupassen. Dementsprechend ist der technische Änderungsprozess nicht nur für die Fertigungssysteme relevant, die nach diesen Paradigmen entworfen wurden, sondern auch ein wesentliches Mittel, um die Vorteile dieser Art von Fertigungssystemen effizient nutzen zu können.

2.4 Weitere Eingrenzung des Untersuchungsbereichs und Detaillierung der Forschungsfrage

Aufgrund der Vielschichtigkeit der Thematik soll in diesem Unterkapitel der Untersuchungsbereich der vorliegenden Arbeit anhand der beschriebenen Kategorien aus Unterkapitel 2.3.1 weiter eingegrenzt werden. Bezüglich der Systemebene liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Maschinen- und Baugruppenebene. Folglich sind die Untersuchungsobjekte hierbei Fertigungsmaschinen oder einzelne Baugruppen dieser Maschinen mit dem Zusatz, dass nur automatisierte bzw. mechatronische Objekte betrachtet werden. Aus einer Studie von Koch et al. aus dem Jahre 2015 geht hervor, dass die Thematik der technischen Änderungen insbesondere für Maschinen- und Anlagenbauer sehr relevant ist und die oben gewählte Systemebenen für diese Branche von großer Bedeutung sind, da die konstruierten Maschinen und Anlagen im Laufe ihrer Lebensphasen häufig angepasst werden müssen [KBH+15]. Es ist anzumerken, dass bei den Untersuchsuchungsobjekten hierbei nicht zwischen konventionell entworfenen Maschinen und Maschinen, die nach den genannten Design-Paradigmen entworfen wurden, unterschieden wird, da beide Arten von Maschinen technischen Änderungen unterliegen können, wie in Unterkapitel 2.3.3 erläutert. Des Weiteren werden nur Maschinen und Baugruppen betrachtet, die sich bereits in der Betriebsphase befinden. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die Untersuchungsobjekte bereits in Betrieb genommen wurden und für definierte Fertigungsaufgaben spezifiziert sowie funktionsfähig sind. Aufgrund der relativ langen durchschnittlichen Betriebsphase von Fertigungsmaschinen, die mehrere Jahre bis zu einigen Jahrzehnten betragen kann, sind technische Änderungen in dieser Lebensphase keine Seltenheit und sind wegen der hohen Investitionskosten der Maschine meist notwendig, um eine *Degenerierung* der Maschinen zu vermeiden und sie weiterhin profitabel nutzen zu können [LFL16]. Des Weiteren werden in der vorliegenden Arbeit technische Änderungen untersucht, die bezüglich ihrer zu ändernden Fähigkeitsarten unter der Kategorie *Anpassung der Merkmalausprägungen von vorhandenen Fertigungs- oder Materialflussfähigkeiten* einzuordnen sind. Dies bedeutet, dass die Untersuchungen sich auf Änderungen bezüglich der Wertebereiche von vorhandenen Merkmalen, die die Untersuchungsobjekte spezifizieren, beschränken. Solche Änderungen sind bezüglich ihres Aufwand-Nutzen-Verhältnisses relativ vielversprechend [HFM+17#]. Zudem sind Anpassungen von bereits vorhandenen Fähigkeiten in der Praxis meist naheliegender als beispielsweise die Integration von zusätzlichen neuen Fähigkeiten. Änderungen bezüglich der Menge der Merkmale werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Der beschriebene Untersuchungsbereich wurde in Abbildung 2-5 grafisch dargestellt.

Bezüglich der vorgestellten Prozessphasen (siehe Unterkapitel 2.3.2) liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf den beiden Phasen Änderungsbedarfsermittlung und Lösungsfindung. Da diese beiden Phasen den Änderungsprozess einleiten, haben Fehler in diesen frühen Phasen einen Einfluss auf alle verbleibenden vier Phasen. Dementsprechend haben diese beiden Phasen einen wesentlichen Einfluss auf die erfolgreiche und effiziente Umsetzung des technischen Änderungsprozesses. Aufgrund dieser getroffenen Eingrenzungen kann die Forschungsfrage aus Unterkapitel 1.2 in den nachfolgenden zwei Teilforschungsfragen detailliert werden.

Teilforschungsfrage 1: Lassen sich Änderungsbedarfe auf Merkmalebene an automatisierten Fertigungsmaschinen, die sich in der Betriebsphase befinden, und deren Baugruppen mithilfe von Modellen automatisiert ermitteln, um Ingenieure bei der Analyse der Erfüllbarkeit von Kundenanforderungen zu unterstützen?

Teilforschungsfrage 2: Können aus den ermittelten Änderungsbedarfen mithilfe von Abhängigkeitsmodellen Änderungsmöglichkeiten auf Merkmalebene für automatisierte Fertigungsmaschinen, die sich in der Betriebsphase befinden, und deren Baugruppen automatisiert ermittelt werden, um Ingenieure bei der Lösungsfindung in Änderungsprojekten zu unterstützen?

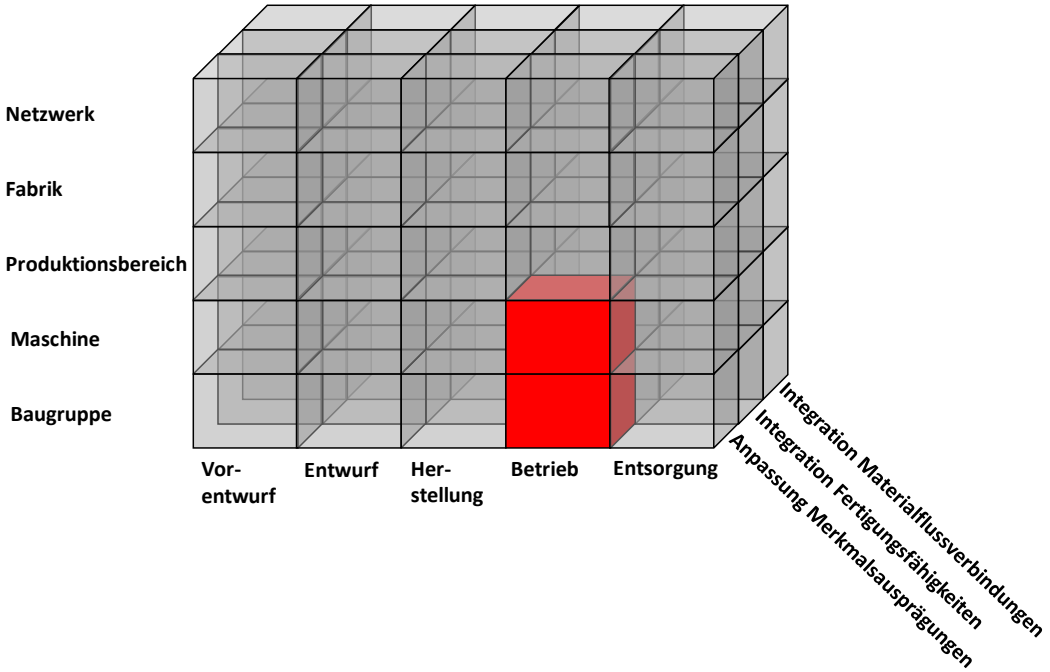

Abbildung 2-5: Grafische Darstellung des Untersuchungsbereichs

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden diese beiden Teilforschungsfragen beantwortet. Basierend auf den Teilforschungsfragen können zwei Teilziele formuliert werden. Das erste Teilziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung eines Modells und einer Methode zur automatisierten Ermittlung des Änderungsbedarfs auf Merkmalebene an automatisierten Fertigungsmaschinen und deren Baugruppen, die sich bereits in der Betriebsphase befinden. Das zweite Teilziel ist die Entwicklung eines Abhängigkeitsmodells, welches mit dem erarbeiteten Modell aus dem ersten Teilziel verknüpft ist, und einer Methode für die automatisierte Generierung von Änderungsmöglichkeiten auf Merkmalebene für die zu untersuchenden automatisierten Fertigungsmaschinen und deren Baugruppen.

2.5 Anforderungen an den zu erarbeitenden Lösungsansatz

Die Entwicklung von automatisierten Fertigungssystemen sowie auch anderen mechatronischen Systemen ist eine interdisziplinäre Aufgabe von unterschiedlichen Gewerken [GSG+09]. Beispielsweise zählen zu diesen Gewerken, das Gewerk der Mechanik, Elektrotechnik und des Software-Engineerings. Aufgrund dieser Interdisziplinarität besitzen die Systeme zusätzlich zu den gewerkeinternen Abhängigkeiten auch diverse gewerkeübergreifende Abhängigkeiten, wodurch die Systeme eine relativ hohe Komplexität besitzen [JFW+11]. Im Gegensatz zur Entwicklung von neuen Systemen, bei denen die Anzahl der Abhängigkeiten des Systems sukzessive mit dem Voranschreiten der Lebenszyklusphasen steigt, müssen bei technischen Änderungen, die innerhalb der Betriebsphase stattfinden, Systeme analysiert werden, die bereits eine Vielzahl an Abhängigkeiten aufweisen. Dementsprechend muss bei solchen technischen Änderungen für die Lösungsfindung eine Vielzahl von gewerkeinternen und -übergreifende Abhängigkeiten betrachtet werden, um durch die geplanten Änderungen das gewünschte

Systemverhalten zu erreichen, ohne unbeabsichtigte negative Nebeneffekte [LAD18]. Hierbei sind die Abhängigkeiten bei Fertigungssystemen selten formal oder in einem einheitlichen Format beschrieben [STR14]. Dieser Umstand erschwert die Analyse während der Lösungsfindungsphase zusätzlich. Darüber hinaus müssen bei der Änderungsbedarfsermittlung die aktuell vorhandenen Fertigungsmöglichkeiten des zu betrachtenden Systems analysiert werden, z.B. welche Produkte von dem betrachteten System gefertigt werden können. Auf Basis dieser Analyse kann ermittelt werden, ob eine Fertigungsanfrage von einem Fertigungssystem bearbeitet werden kann oder ob eine technische Änderung vorgenommen werden muss. Die Informationen bezüglich der Fertigungsmöglichkeiten sind jedoch selten explizit beschrieben oder dokumentiert [JLL+11]. Die Bestimmung solcher Fertigungsmöglichkeiten wiederum ist bei komplexeren Fertigungssystemen nicht trivial, da die Fertigungsmöglichkeiten sich aus der Aggregation unterschiedlicher Teilfunktionalitäten ergeben können und von verschiedenen Aspekten abhängen [JÄTO13]. Ein solcher Aspekt sind die oben erwähnten Abhängigkeiten, die einen wesentlichen Einfluss auf die Funktionalitäten eines Systems haben [EGB+14]. Erschwerend hinzu kommt, dass die Ingenieure bei den Änderungsprojekten wenig bzw. keine methodische Unterstützung erfahren und primär auf ihr Erfahrungswissen angewiesen sind [STR14]. Auf Basis der beschriebenen Herausforderungen ergeben sich im Zusammenhang mit den Zielsetzungen dieser Arbeiten verschiedene Anforderungen an den zu entwickelnden Lösungsansatz. Die Anforderungen werden im Folgenden beschrieben und diskutiert.

Um Ingenieure bei der Änderungsbedarfsermittlung methodisch zu unterstützen wird ein Modell benötigt, welches die aktuellen Fertigungsmöglichkeiten inklusive der dazugehörigen Fertigungsanforderungen eines Systems abbildet [JLT16]. Ein solches Modell, welches im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch als Fähigkeitsmodell bezeichnet wird, sollte eine systematische Überprüfung von Fertigungsanfragen hinsichtlich derer Erfüllbarkeit erlauben. Dies bedeutet, dass es möglich sein sollte anhand des Fähigkeitsmodells zu ermitteln, ob das abgebildete Fertigungssystem die gestellten Anforderungen, z.B. von einem Fertigungsauftrag, erfüllen kann. Des Weiteren sollte im Falle einer Nichterfüllbarkeit der Anforderungen das Fähigkeitsmodell Auskunft über die zu ändernden Merkmale geben, um die anschließende Phase der Lösungsfindung zu unterstützen. Dementsprechend kann folgende Anforderung formuliert werden:

Anforderung 1: Es wird ein Fähigkeitsmodell zur Abbildung von automatisierten Fertigungssystemen benötigt, welches es erlaubt die Erfüllbarkeit von gestellten Fertigungsanforderungen systematisch zu prüfen sowie bei einer Nichterfüllbarkeit der Anforderungen die dafür relevanten Merkmale zu bestimmen.

Da die Kernkompetenz eines Produktentwicklers darin besteht ein Produkt zu entwickeln, das die Anforderungen seiner Kunden bestmöglich erfüllt, ist es für Produktentwickler einfacher Fertigungsanforderungen produktorientiert zu beschreiben [HHF18#]. Aufgrund dessen sollte das Fähigkeitsmodell mit einer produktorientierten Fertigungsanforderungsbeschreibung kompatibel sein, um die Fertigungsanforderungen, die von Produktentwicklern erstellt werden, hinsichtlich der Erfüllbarkeit direkt analysieren zu können. Hierdurch können Änderungsbedarfe potentiell schneller ermittelt werden, da die Fertigungsanforderungen nicht erst in eine andere Beschreibung, wie z.B. Prozessschritte überführt werden müssen. Dies ist insbesondere in einem Produktionsumfeld vorteilhaft, wo die zu fertigenden Produkte sich häufig ändern [HHF18#]. Demzufolge kann folgende Anforderung formuliert werden:

Anforderung 2: Das benötigte Fähigkeitsmodell sollte kompatibel mit einer produktorientierten Fertigungsanforderungsbeschreibung sein, um die Fertigungsanforderungsbeschreibungen von Produktentwicklern effizient hinsichtlich ihrer Erfüllbarkeit prüfen zu können.

Für die methodische Unterstützung bezüglich der Lösungsfindungsphase ist es notwendig die oben beschriebenen Abhängigkeiten eines zu ändernden Systems in einem Modell abzubilden [JEC+11]. Aufgrund der Interdisziplinarität bei der Entwicklung von automatisierten Fertigungssystemen wird hierbei ein Abhängigkeitsmodell benötigt, welches gewerkeinterne sowie gewerkeübergreifende Abhängigkeiten darstellen kann [ZFB15]. Zusätzlich sollte das Abhängigkeitsmodell es ermöglichen die Auswirkungen von Änderungen auf Merkmalebene zu analysieren, um systematisch Lösungsvorschläge inklusive ihrer Auswirkung für gegebene Änderungsbedarfe zu ermitteln [YADU12]. Hieraus ergibt sich die Anforderung:

Anforderung 3: Es wird ein Abhängigkeitsmodell benötigt, welches es erlaubt für ermittelte Änderungsbedarfe systematisch Änderungsmöglichkeiten auf Merkmalebene, einschließlich ihrer Auswirkungen auf das zu ändernde Fertigungssystem, zu bestimmen.

Damit die Lösungsmöglichkeiten in Hinblick auf die gestellten Fertigungsanforderungen besser nachvollziehbar dargestellt werden können, sollte das Abhängigkeitsmodell des Weiteren auch Interdependenzen zwischen Produkten, Prozessen sowie Fertigungsressourcen berücksichtigen. Hierdurch kann einfacher nachvollzogen werden, inwiefern Änderungen an der Fertigungsressource Einfluss auf den Fertigungsprozess und somit auch auf das zu fertigende Produkt haben [PSB13]. Dies erleichtert auch die Überprüfbarkeit der ermittelten Lösungsmöglichkeiten hinsichtlich der Erfüllung der Fertigungsanforderungen, insbesondere wenn die Anforderungen als zu fertigende Produkte beschrieben werden. Demzufolge kann folgende Anforderung formuliert werden:

Anforderung 4: Das benötigte Abhängigkeitsmodell soll Interdependenzen zwischen Merkmalen von Produkten, Prozessen und Fertigungsressourcen berücksichtigen, um die Auswirkungsanalyse und Nachvollziehbarkeit von ermittelten Änderungsmöglichkeiten bezüglich der Erfüllung von Fertigungsanfragen zu erweitern und zu verbessern.

Basierend auf den Teilzielen aus 2.4 kann abgeleitet werden, dass die Modelle in einem maschinen-interpretierbaren Format vorliegen müssen, um eine automatisierte Auswertbarkeit zu gewährleisten. Aufgrund des teilweisen sehr hohen Zeitdrucks bei Änderungsprojekten, insbesondere während der Betriebsphase eines Systems, da die Stillstandzeiten minimiert werden sollen, kann die automatisierte Auswertbarkeit dabei unterstützen den technischen Änderungsprozess zeitlich zu verkürzen [VFS+15]. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz von automatisierten Assistenzsystemen erreicht werden, die die Modelle korrekt analysieren und auswerten können. Durch die automatisierte Auswertbarkeit kann außerdem eine gewisse Mindestqualität der generierten Ergebnisse gewährleistet werden, unabhängig vom individuellen Wissenstand des jeweiligen Ingenieurs. Zudem ist es vorteilhaft, wenn das Format offen gestaltet ist, um den Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen Tools zu vereinfachen. Dementsprechend ergibt sich folgende Anforderung:

Anforderung 5: Die benötigten Modelle sollen in einem offenen und maschinen-interpretierbaren Format vorliegen, um deren automatische Auswertbarkeit zu gewährleisten.

Gleichzeitig ist es von Vorteil, wenn das Fähigkeitsmodell sowie das Abhängigkeitsmodell miteinander nahtlos verknüpft sind, um den reibungslosen Informationsaustausch zwischen der Änderungsbedarfsermittlungsphase und der Lösungsfindungsphase sicherzustellen. Darüber hinaus leitet sich diese Anforderung auch aus dem zweiten Teilziel dieser Arbeit her, da aus den ermittelten Änderungsbedarfen automatisiert Lösungsmöglichkeiten bestimmt werden sollen. Die Anforderung wird wie folgt formuliert:

Anforderung 6: Die benötigten Modelle sollen systematisch miteinander verknüpft sein, um den Informationsaustausch zwischen der Änderungsbedarfsermittlungsphase und der Lösungsfindungsphase zu optimieren und Informationsverluste zu vermeiden. Des Weiteren sollen dadurch die phasenübergreifende Auswertung und Analyse der Modelle verbessert werden.

Es ist ersichtlich, dass nicht alle Anforderungen für beide Teilziele der Arbeit relevant sind. Beispielsweise betrifft Anforderung 1 und Anforderung 2 lediglich das Fähigkeitsmodell und ist folglich nur relevant für Teilziel 1. Anforderung 3 und Anforderung 4 hingegen betreffen ausschließlich das zu erstellende Abhängigkeitsmodell und besitzen dementsprechend nur eine Relevanz für Teilziel 2. Die restlichen Anforderungen gelten für beide Teilziele.

3 Objekte von automatisierten Fertigungssystemen und Abhängigkeiten zwischen diesen

In diesem Kapitel wird das in dieser Arbeit vorliegende Systemverständnis bezüglich automatisierter Fertigungssysteme dargelegt. Hierbei werden in Unterkapitel 3.1 die verschiedenen Objekte und der Aufbau von automatisierten Fertigungssystemen erläutert, um eine Basis für die Fähigkeitsmodellierung zu schaffen. Die Basis für die Abhängigkeitsmodellierung wird in Unterkapitel 3.2 beschrieben, wo die unterschiedlichen Beziehungen und Abhängigkeiten der Objekte innerhalb von automatisierten Fertigungssystemen erläutert werden.

3.1 Objekte und Aufbau von automatisierten Fertigungssystemen

In diesem Unterkapitel werden im ersten Schritt, auf Basis von bestehenden und weitverbreiteten Systemdarstellungen aus der Fachliteratur, die unterschiedlichen Objekttypen von automatisierten Fertigungssystemen sowie deren Zusammenhänge hergeleitet und erläutert. Anschließend werden die Komponenten und der Aufbau einer technischen Ressource genauer beschrieben, welche einen wichtigen Objekttypen von Fertigungssystemen in Hinblick auf technische Änderungen darstellt.

3.1.1 Objekttypen und deren Zusammenhänge

Eine weitverbreitete Klassifizierung der Objekte im Zusammenhang mit Fertigungssystemen wird im sogenannten Produkt-Prozess-Ressource-Konzept (PPR-Konzept) vorgestellt. Das PPR-Konzept unterteilt Objekte in Produkte, Prozesse und Ressourcen [CYM+07]. Ein Produkt kann ein Anfangs-, Zwischen- oder Endprodukt einer Produktion darstellen. Ein Prozess im PPR-Konzept ist ein technischer Vorgang, der eine Änderung an einem Produkt durchführt. Eine Ressource hingegen repräsentiert ein Produktionssystem oder ein Teilsystem, welches bestimmte Prozesse ausführen kann. Diese Unterteilung der Objekte eines Fertigungssystems ist sehr generisch und anwendbar auf fast jegliche Art von Fertigungssystemen. Die Zusammenhänge zwischen den Objekten werden in Abbildung 3-1 dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass nach dem PPR-Konzept ein Fertigungssystem so aufgebaut ist, dass innerhalb des Systems eine *Ressource* einen *Prozess* ausführt, der wiederum ein *Produkt* ändert.

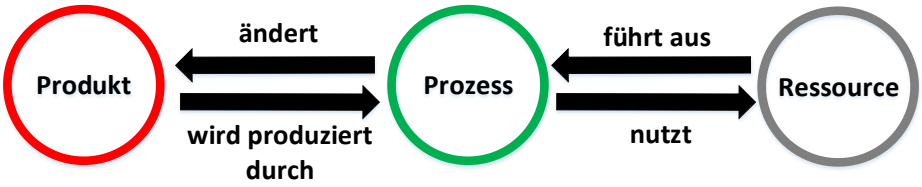

Abbildung 3-1 Übersicht des PPR-Konzepts nach [SCDR09]

Die im PPR-Konzept beschriebene Objektaufteilung sowie deren Zusammenhänge bilden eine gute Grundlage für das Verständnis von Fertigungssystemen, jedoch umfasst diese Aufteilung nicht alle wesentlichen Bestandteile eines automatisierten Fertigungssystems. In der Konstruktionslehre werden in Zusammenhang mit der Beschreibung von Funktionen technischer Systeme noch weitere Objekte zusätzlich zum Produkt betrachtet, die von Prozessen umgewandelt werden können [PBB+07]. Die Definition des Funktionsbegriffs entspricht dabei der Definition des Fähigkeitsbegriffs aus Unterkapitel 3.2.

Pahl et al. beschreiben in [PBB+07], einem Grundlagenbuch der Konstruktionslehre, dass innerhalb technischer Systeme gewisse Operationen ausgeführt werden. Der Operationsbegriff ist hierbei mit dem Prozessbegriff aus dem PPR-Konzept gleichzusetzen. Anders als im PPR-Konzept können Operationen in [PBB+07] Materialien, Energien sowie Signale verändern und umwandeln, wie in Abbildung 3-2 dargestellt. Des Weiteren ist in der Abbildung zu erkennen, dass die Materialien, Energien und Signale die Eingangs- bzw. Ausgangsobjekte der Operationen darstellen. Dementsprechend befinden sich diese Objekte an der Systemgrenze des technischen Systems und bilden die Schnittstelle zu anderen technischen Systemen. In [PBB+07] können technische Systeme zudem noch in weitere Subsysteme aufgeteilt werden, die Teiloperationen der übergeordneten Operation ausführen, was ebenfalls in Abbildung 3-2 dargestellt ist. Bei Pahl et al. kann der Materialbegriff verschiedenste Stoffe und Produkte umfassen, wie beispielsweise Gas, Flüssigkeit, Feststoff, Rohmaterial, Werkstück, Endprodukt oder Bauteil, und ist dementsprechend mit dem Produktbegriff aus dem PPR-Konzept vergleichbar. Der Energiebegriff kann jegliche Art von Energieformen umfassen, wie z.B. mechanische, thermische, elektrische, chemische oder optische Energie. Unter dem Signalbegriff können beispielsweise Steuerimpulse, Daten oder Informationen zusammengefasst werden. Für die Energie- sowie Signalobjekte gibt es keine äquivalenten Objekte im PPR-Konzept. Bei Pahl et al. werden die Operationen von technischen Artefakten ausgeführt, die gleichzusetzen sind mit den Ressourcen aus dem PPR-Konzept.

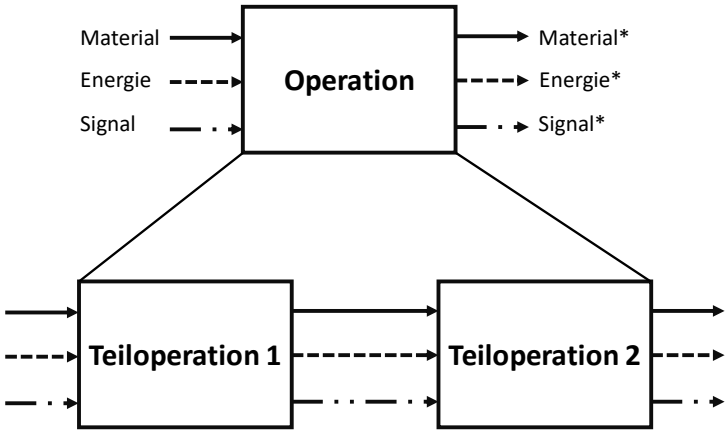

Abbildung 3-2 Operationsstruktur von technischen Systemen nach [PBB+07]

Die beschriebene Objektaufteilung und deren Zusammenhänge innerhalb technischer Systeme aus der Konstruktionslehre erweitern das PPR-Konzept und bilden dementsprechend eine detailliertere sowie umfassendere Grundlage für das Verständnis von Fertigungssystemen. Die Richtlinie [VDI/VDE 3682] beschreibt das gleiche Systemverständnis in Zusammenhang mit der in der Richtlinie vorgestellten Formalisierten Prozessbeschreibung (FPB). Die Systembeschreibung besteht dabei aus den Objekten *Produkt*, *Energie*, *Information*, *Prozessoperator* und *technische Ressource*. Die graphische Notation der Objekte ist in Abbildung 3-3 dargestellt. Der Produktbegriff in der Richtlinie ist gleich dem Produktbegriff aus dem PPR-Konzept. Der Energie- und Informationsbegriff entspricht der Beschreibung des Energie- und Signalbegriffs aus [PBB+07]. Die *Prozessoperatoren* und *technischen Ressourcen* aus der Richtlinie sind gleichzusetzen mit den *Prozessen* bzw. den *Operationen* aus dem PPR-Konzept bzw. aus [PBB+07] und den *Ressourcen* bzw. *technischen Artefakten*.

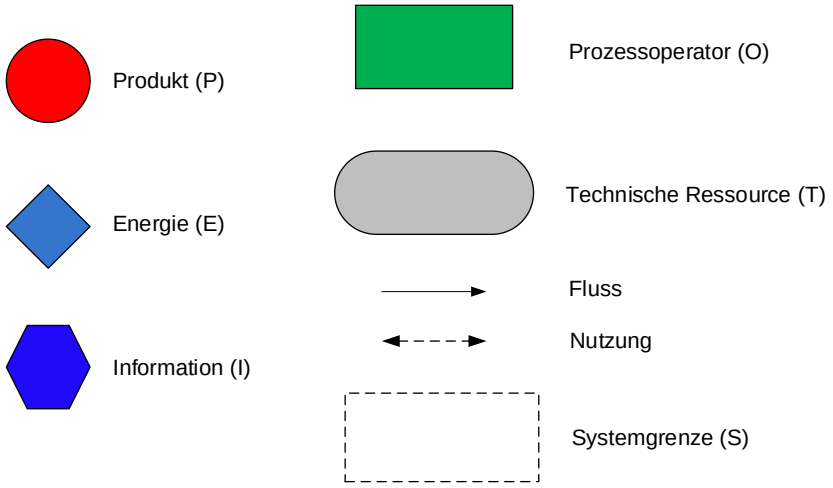

Abbildung 3-3 Graphische Notation der Formalisierten Prozessbeschreibung nach [VDI/VDE 3682]

Die beschriebenen Zusammenhänge zwischen den Objekten in der Richtlinie sind gleich wie in [PBB+07]. Analog zur Beschreibung von Pahl et al. besitzt der *Prozessoperator Produkte*, *Informationen* und *Energien* als Eingangsobjekte, die er in Ausgangsprodukte, -informationen bzw. -energien umwandelt. Für diese Umwandlung nutzt der *Prozessoperator* eine *technische Ressource*. Die Zusammenhänge zwischen den Objekten sind in Abbildung 3-4 dargestellt. Aus der Abbildung ist ebenfalls ersichtlich, dass *Produkte*, *Informationen* und *Energien* auf der Systemgrenze des zu beschreibenden Systems liegen können und dementsprechend die Schnittstelle zu anderen Systemen bilden, was deckungsgleich mit der Beschreibung von Pahl et al. ist. Des Weiteren können in beiden Systemdarstellungen, die Systeme weiter detailliert werden. In der FPB findet dies durch eine Dekomposition statt, wobei die *Prozessoperatoren* und ggf. die dazugehörigen *technischen Ressourcen* aufgegliedert werden. Die dazugehörigen *Produkte*, *Informationen* und *Energien* werden nicht dekomponiert. Die beschriebene Dekomposition eines Systems ist ebenfalls beispielhaft in Abbildung 3-4 dargestellt.

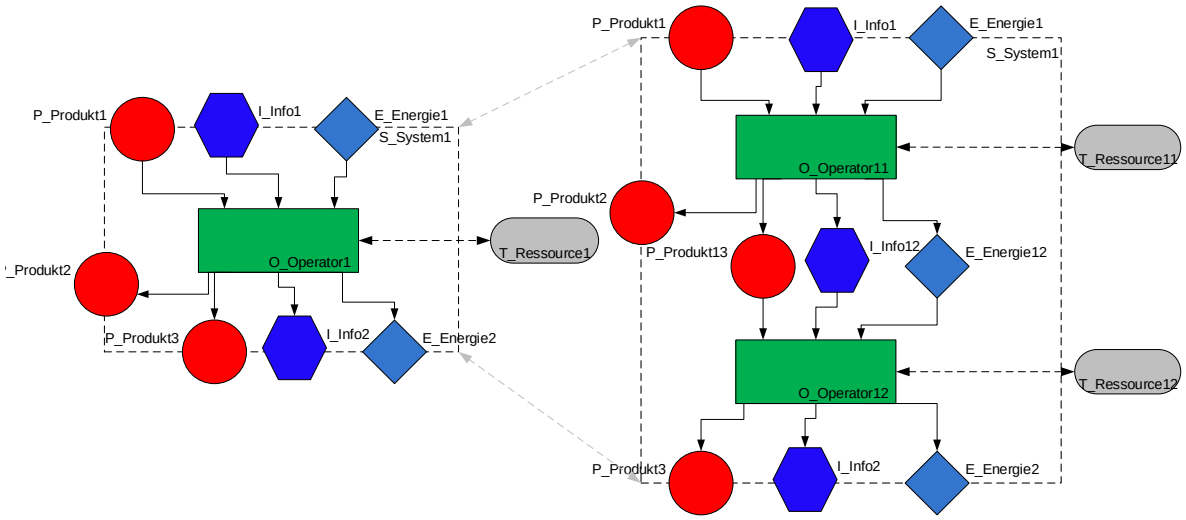

Abbildung 3-4 Beispielhafte Darstellung der Formalisierten Prozessbeschreibung nach [VDI/VDE 3682]

Demzufolge beschreibt die Formalisierte Prozessbeschreibung das gleiche Systemverständnis wie Pahl et al. bezüglich der Objektaufteilung innerhalb technischer Systeme und deren Zusammenhängen, wel-

ches ebenfalls das PPR-Konzept beinhaltet. Der Vorteil der FPB gegenüber den beiden anderen Systemverständnissen ist dabei, dass die beschriebenen Inhalte standardisiert in Form der Richtlinie [VDI/VDE 3682] vorliegen. Aufgrund dessen bildet das in der FPB beschriebene Systemverständnis eine gute Ausgangsbasis. Deshalb wird dieses Systemverständnis als Basis für die Modellierung von automatisierten Fertigungssystemen in der vorliegenden Arbeit genutzt.

3.1.2 Komponenten und Aufbau von technischen Ressourcen

Bei automatisierten Fertigungssystemen kann die technische Ressource eine oder mehrere physische und/oder softwaretechnische Komponenten repräsentieren [STR14]. Physische Komponenten von automatisierten Fertigungssystemen können beispielsweise Aktoren, Sensoren, rein mechanische Komponenten oder auch Automatisierungs- und Kommunikationsgeräte sein [LMC+14]. Softwaretechnische Komponenten können z.B. Softwaremodule sein, die für die Steuerung oder Regelung eines Prozesses zuständig sind. Bei automatisierten Fertigungssystemen befinden sich diese softwaretechnischen Komponenten auf Automatisierungsgeräten wie z.B. auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) und können in Form einer Programmiersprache nach [IEC 61131] vorliegen. In [LMC+14] wird von Legat et al. eine Aufteilung der Komponenten von technischen Ressourcen im Zusammenhang mit automatisierten Fertigungssystemen vorgestellt. Diese Aufteilung der Komponenten von technischen Ressourcen wird ebenfalls in der vorliegenden Arbeit verwendet. Dabei wird die technische Ressource in die drei Bereiche *Kontext*, *Plattform* und *Software* unterteilt (siehe Abbildung 3-5).

Der *Kontextbereich* umfasst Komponenten, die in direktem Kontakt mit dem Produkt stehen und dadurch einen unmittelbaren Einfluss auf den Fertigungsprozess haben. Komponenten in diesem Bereich sind beispielsweise Aktoren, Sensoren und rein mechanische Komponenten, wobei die beiden erstgenannten Komponententypen sich auf der Grenze zwischen dem *Kontext*- und *Plattformbereich* befinden. Dementsprechend gehören Aktoren und Sensoren sowohl zum *Kontext*- als auch zum *Plattformbereich*. Der *Plattformbereich* beinhaltet zudem Komponenten, die für die Kommunikations-, Daten- und Energieflüsse zuständig sind, wie beispielsweise Busgeräte, Steuerungen oder Ventilinseln. Der *Softwarebereich* beinhaltet die Steuerungscodekomponenten des Systems, die sich auf Komponenten des *Plattformbereichs*, wie z.B. auf einer SPS, befinden. [LMC+14] In Abbildung 3-5 ist die beschriebene Aufteilung der technischen Ressource nach Legat et al. mit beispielhaften Komponenten dargestellt.

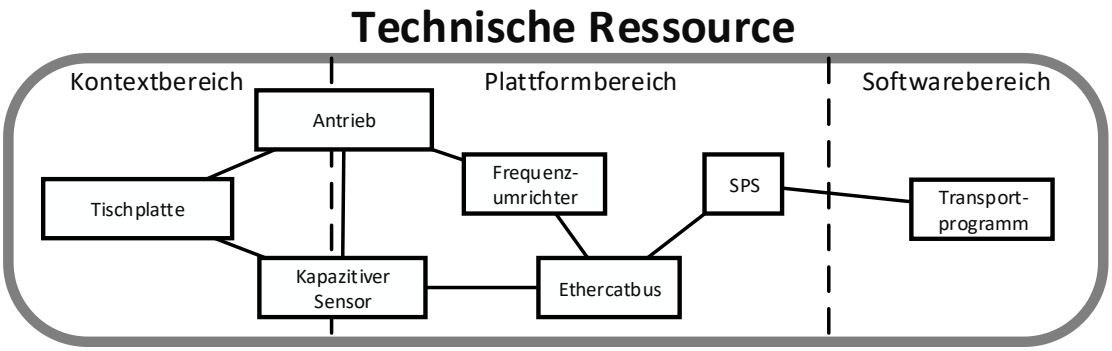

Abbildung 3-5 Aufteilung der technischen Ressource nach [LMC+14] mit beispielhaften Komponenten

Es ist hierbei anzumerken, dass diese Ressourcenaufteilung lediglich für Fertigungssysteme anwendbar ist, die ein mechatronisches System repräsentieren. Für Systemebenen, wo die technische Ressource

eine rein physische oder softwaretechnische Komponente darstellt, ist die beschriebene Aufteilung der Ressource folglich nicht sinnvoll.

Bezüglich des Aufbaus von automatisierten Fertigungssystemen ist die strukturelle Anordnung der physischen Komponenten von technischen Ressourcen ein wichtiger Aspekt, der die räumliche Verteilung der Komponenten widerspiegelt. Ein weiterer wichtiger Aspekt hinsichtlich des Aufbaus von automatisierten Fertigungssystemen ist die Softwarearchitektur, die den programmiertechnischen Aufbau der Softwarekomponenten darstellt. Aufgrund dessen ist die technische Ressource ein wesentlicher Objekttyp hinsichtlich der technischen Änderung von automatisierten Fertigungssystemen. Hierbei sind insbesondere die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten der technischen Ressource (siehe Unterkapitel 3.2.3) ein wichtiger Aspekt.

3.2 Abhängigkeiten zwischen den Objekten automatisierter Fertigungssysteme

Auf Basis der beschriebenen Objektaufteilung und deren Zusammenhängen aus dem vorherigen Unterkapitel werden in diesem Unterkapitel die unterschiedlichen Abhängigkeiten zwischen den Objekten des Fertigungssystems beschrieben und erläutert. Diese Informationen bezüglich der Objektbeziehungen sind wesentlich für die Analyse von Änderungsauswirkungen und für die Generierung von Änderungsmöglichkeiten [SCH02]. Hierbei werden zunächst die Abhängigkeiten zwischen den Eingangs- bzw. Ausgangsobjekten und dem Prozess erläutert. Darauffolgend werden die Abhängigkeiten zwischen Prozessen sowie zwischen dem Prozess und der technischen Ressource beschrieben. Abschließend werden die Abhängigkeiten innerhalb und zwischen technischen Ressourcen und ihren Komponenten erläutert.

3.2.1 Abhängigkeiten zwischen Produkt, Information, Energie und Prozess

Wie bereits in Unterkapitel 3.1 erläutert, stellen Produkte, Informationen und Energien die Eingangs- sowie Ausgangsobjekte eines technischen Prozesses dar. Hierbei werden in der Regel die Eigenschaften der Eingangsprodukte durch unterschiedliche naturwissenschaftliche Effekte, die während des Prozesses stattfinden, verändert und dadurch in ein oder mehrere Ausgangsprodukte umgewandelt. Ebenfalls ist es möglich, dass mehrere Eingangsprodukte zu einem Ausgangsprodukt umgewandelt werden. Bei gewissen Prozessen, wie z.B. Prüfprozessen, kann es außerdem vorkommen, dass das Eingangsobjekt bzw. die Eingangsobjekte ohne wirkliche Änderung in ein bzw. mehrere Ausgangsobjekte überführt werden. In den Fällen der Prüfprozesse ist das Ziel der Prozesse bestimmte Eigenschaften des Produkts zu ermitteln und diese als Ausgangsinformationen auszugeben.

Analog zu den Produkten können Prozesse ebenfalls Eingangsinformationen in Ausgangsinformationen umwandeln. Ein Beispiel dafür sind Rechenoperationen, die aus zwei Termen (Eingangsinformationen) einen resultierenden Term (Ausgangsinformation) generieren. Bei automatisierten Prozessen können Eingangsinformationen außerdem dazu dienen den Prozess zu starten. Des Weiteren kann ein Prozess auch Ausgangsinformationen generieren ohne dazugehörige Eingangsinformationen umzuwandeln. Beispiele diesbezüglich sind die oben genannten Prüfprozesse oder auch Stoppsignale, die bei Beendigungen eines Prozesses ausgegeben werden.

Wie die beiden vorangegangenen Objekttypen können auch Energien bzw. deren Eigenschaften durch den Prozess umgewandelt werden. Diese Umwandlung kann dabei ein Hauptziel des Prozesses sein oder auch als Nebenläufigkeit geschehen. Ein Beispiel für ersteres ist der technische Prozess eines Frequenzumrichters, wo die Frequenz und Amplitude einer Eingangsspannung verändert und als eine Ausgangsspannung ausgegeben wird. Als Beispiel für letzteres kann ein Bohrprozess aufgeführt werden,

in dem elektrische Eingangsenergie benötigt wird, um den Prozess durchzuführen und u.a. aufgrund von Reibungseffekten thermische Energie beiläufig als Ausgangsenergie erzeugt.

3.2.2 Abhängigkeiten zwischen Prozessen sowie zwischen Prozess und Ressource

Aus den vorangegangenen Erläuterungen ist bekannt, dass technische Ressourcen für die Ausführung der Prozesse zuständig sind. Für diese Ausführung werden naturwissenschaftliche Effekte von der technischen Ressource genutzt. Die Effekte an sich können lösungsneutral beschrieben werden. Um die Effekte wiederum zu realisieren, können technische Ressourcen unterschiedliche Wirkprinzipien verwenden. Die Wirkprinzipien hängen dabei unmittelbar von der konstruktiven Umsetzung und den Merkmalen der technischen Ressource ab. [PABE97] Aufgrund dieser Zusammenhänge haben die konstruktiven Merkmale der technischen Ressource einen Einfluss auf die Merkmale des Wirkprinzips und haben demzufolge auch Auswirkung auf die Merkmale des Prozesses. Des Weiteren können die Prozesse und deren Merkmale sich ebenfalls untereinander, bedingt durch physikalische Zusammenhänge oder anderen Restriktionen, wie z.B. Sicherheits- oder Qualitätsvorschriften, beeinflussen. Beispielsweise besteht bei einem Bohrprozess eine Abhängigkeit zwischen den Prozessmerkmalen Vorschubgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit, um gewisse Qualitätsmerkmale beim Bohrlochbild zu erhalten und den Werkzeugverschleiß gering zu halten. Folglich ist die Ermittlung dieser Zusammenhänge unerlässlich, um durch technische Änderungen an der technischen Ressource zielführende Änderungen am Prozess zu erreichen, ohne unbeabsichtigte Nebenwirkungen zu erhalten. Die beschriebenen Zusammenhänge sollen anhand des Beispiels einer Luftkissenrutsche aus Abbildung 3-6 verdeutlicht werden. Zur Ausführung eines Transportprozesses soll die Gravitation als naturwissenschaftlicher Effekt verwendet werden (siehe Abbildung 3-6 links). Dieser Effekt soll durch die Konstruktion einer Luftkissenrutsche zielgerichtet genutzt werden. Die entscheidenden Merkmale bei der Konstruktion und des Wirkprinzips diesbezüglich sind in Abbildung 3-6 (rechts) abgebildet. Ein wichtiges Merkmal hierbei ist der Winkel α, der die Neigung der Luftkissenrutsche beschreibt und einen wesentlichen Einfluss auf die *Hangabtriebskraft* F_H und *Normalkraft* F_N hat, die aus der *Gewichtskraft* F_G resultieren. Die *Hangabtriebskraft* bewirkt hierbei, dass das zu transportierende Produkt hangabwärts befördert wird. Der *Hangabtriebskraft* entgegen wirkt die *Reibkraft* F_R, die sich aus F_N multipliziert mit dem *Reibungskoeffizienten* μ ergibt. Der *Reibungskoeffizient* hängt bekanntlich wiederum u.a. von der Oberflächenrauheit der Rutsche und des Produkts ab. Ein weiteres Merkmal bei der Luftkissenrutsche ist die *Luftkissenkraft* F_L, die entgegen der *Normalkraft* wirkt und durch Druckluft erzeugt wird.

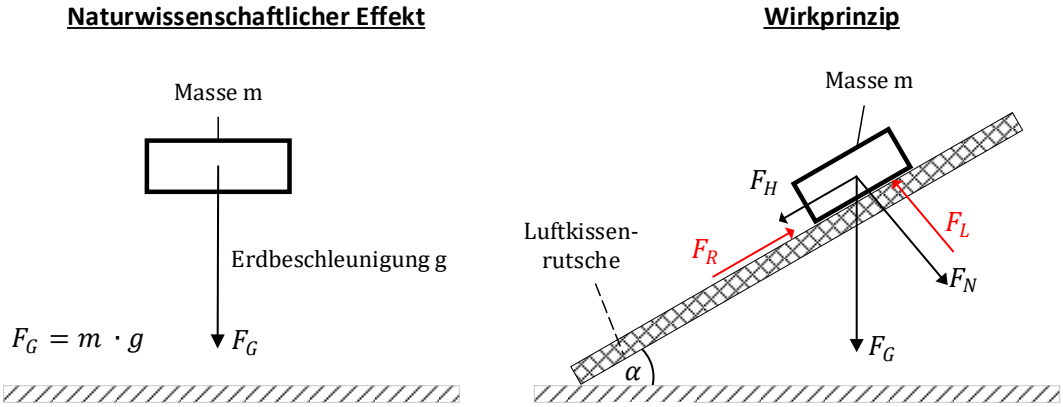

Abbildung 3-6 Beispiel Luftkissenrutsche für Beziehungen zwischen Prozess und technischer Ressource

In Tabelle 3-1 sind die Merkmale des Beispiels nach den Objekttypen technische Ressource, Prozess und Produkt sortiert. Hierbei ist anzumerken, dass die Ressourcenmerkmale von einem Konstrukteur direkt anhand der Auslegung des Systems bestimmt werden können. Anhand der Ressourcenmerkmale können auf Basis der beschriebenen Abhängigkeiten die Prozessgrößen geändert werden. In diesem Beispiel haben die Produktmasse und die Produktoberflächenbeschaffenheit ebenfalls einen Einfluss auf die Prozessmerkmale, jedoch haben Konstrukteure der Ressource meist keinen Einfluss auf die Produktmerkmale. Wie in der Tabelle gelistet, sind der *Neigungswinkel*, die *Druckluft* sowie die *Oberflächenbeschaffenheit* der Rutsche der technischen Ressource zugeordnet. Alle Kräfte im Beispiel sowie die *Erdbeschleunigung* und der *Reibungskoeffizient* sind dem Prozess zugewiesen. Hierbei gibt es Abhängigkeiten zwischen den Prozessmerkmalen, da die *Normalkraft* sowie *Hangabtriebskraft* aus der *Gewichtskraft* resultieren. Angenommen ein Konstrukteur möchte nun die Transportzeit des Prozesses verkürzen. Anhand der beschriebenen Merkmale und Abhängigkeiten kann analysiert werden, dass ein Konstrukteur dafür die Prozessgröße *Hangabtriebskraft* vergrößern und/oder die *Reibkraft* verringern muss. Dies kann er in diesem Beispiel durch unterschiedliche technische Änderungen an der Ressource bewerkstelligen. Eine Möglichkeit wäre die Vergrößerung des *Neigungswinkels*, um F_H zu erhöhen und zeitgleich F_N und dadurch auch F_R zu reduzieren. Weitere Möglichkeiten wären die Erhöhung der *Druckluft*, um F_L zu erhöhen und dadurch F_N und F_R zu verringern, und die Verringerung der *Rutschenoberflächenrauheit*, um μ zu reduzieren und dadurch wiederum F_R zu verkleinern.

Die erläuterten Zusammenhänge bestehen primär zwischen dem Prozess und den Komponenten des Kontextbereichs von automatisierten Fertigungssystemen, da diese Komponenten die Wirkprinzipien direkt umsetzen. In dem Beispiel der Luftkissenrutsche wären diese Komponenten die *Rutsche* und das *Druckluftventil* zur Erzeugung des Luftpolsters. Die Komponenten der anderen Bereiche haben lediglich einen indirekten Zusammenhang mit dem Prozess durch Abhängigkeiten innerhalb der technischen Ressource. Diese internen Beziehungen der Ressource werden im nachfolgenden Unterkapitel 3.2.3 erläutert.

Tabelle 3-1 Kategorisierung der Merkmale aus dem Beispiel Luftkissenrutsche

Technische Ressource	Prozess	Produkt
Neigungswinkel α	Gewichtskraft $\boldsymbol{F_G}$	Masse $\boldsymbol{m}$
Druckluft $\boldsymbol{p}$	Hangabtriebskraft $\boldsymbol{F_H}$	Produktoberflächenrauheit
Rutschenoberflächenrauheit	Normalkraft $\boldsymbol{F_N}$	
	Reibkraft $\boldsymbol{F_R}$	
	Luftkissenkraft $\boldsymbol{F_L}$	
	Erdbeschleunigung $\boldsymbol{g}$	
	Reibungskoeffizient $\boldsymbol{\mu}$	

3.2.3 Abhängigkeiten zwischen und innerhalb technischer Ressourcen

Zwischen und innerhalb technischer Ressourcen kann es verschiedene Abhängigkeiten zwischen den Ressourcenkomponenten geben. Diese Abhängigkeiten besitzen im Zusammenhang mit technischen

Änderungen eine wichtige Bedeutung, da sie mit der Konstruktion der Ressource in Verbindung stehen und durch Ingenieure geändert werden können. In der Fachliteratur gibt es diverse Klassifizierungen von Abhängigkeiten in Zusammenhang mit technischen Ressourcen, wie beispielweise in [KAR14] und [PIEP94]. Basierend auf diesen bestehenden Kategorisierungen wird in der vorliegenden Arbeit folgende Aufteilung für die Abhängigkeiten zwischen und innerhalb technischer Ressourcen betrachtet:

Räumliche Abhängigkeiten: Beschreiben Abhängigkeiten, die aufgrund der räumlichen Anordnung der physischen Komponenten auftreten. Die geometrischen Merkmale der Komponenten, wie z.B. Außenmaße, sind dabei entscheidende Faktoren bei dieser Abhängigkeitskategorie.

Mechanische Abhängigkeiten: Beschreiben Abhängigkeiten bezüglich der mechanischen Verbindungen zwischen physischen Komponenten. Diese Verbindungen können in verschiedenster Form vorliegen wie beispielsweise als Schraubverbindung, Schweißverbindung, Nietverbindung oder Klebung.

Energetische Abhängigkeiten: Beschreiben Abhängigkeiten, die aufgrund von energetischem Austausch zwischen physischen Komponenten auftreten. Hierbei können zwischen den physikalischen Komponenten unterschiedlichste Formen von Energie, wie z.B. elektrische, thermische, pneumatische oder hydraulische Energie, ausgetauscht werden.

Informationstechnische Abhängigkeiten: Beschreiben Abhängigkeiten hinsichtlich des Austausches von Informationen, Daten und Signalen zwischen physischen Komponenten. Dieser Austausch kann mithilfe von physischen Verbindungen, wie z.B. Kabelverbindungen, aber auch von drahtlosen Verbindungen, beispielsweise WLAN oder Bluetooth, stattfinden.

Logische Abhängigkeiten: Beschreiben Abhängigkeiten zwischen Softwarekomponenten einschließlich deren Variablen hinsichtlich der Steuerung des Ablaufs. Die Variablen können dabei eine rein virtuelle Größe sein oder ein physisches Signal aus dem Feld repräsentieren. Diese Abhängigkeiten können u.a. Schaltbedingungen sein, die z.B. als Transition in der Ablaufsprache oder als Funktionsbaustein in der Funktionsbausteinsprache nach [IEC 61131] vorliegen.

Prozesstechnische Abhängigkeiten: Beschreiben Abhängigkeiten bezüglich der Interaktionen zwischen physischen Komponenten zur Durchführung des technischen Prozesses, die über die bisherigen Abhängigkeitsklassen hinausgehen. Ein Beispiel für eine solche Abhängigkeit ist die Beziehung zwischen einem Endlagensensor und einem doppeltwirkenden Zylinder. Eine Abhängigkeit ist hierbei vorhanden, da der Endlagensensor einen Überwachungsprozess bezüglich der Position des Aktors durchführt.

Betrachtet man nun die beschriebene Komponentenaufteilung der technischen Ressource nach Legat et al. (siehe Unterkapitel 3.1.2) in Zusammenhang mit der vorgestellten Abhängigkeitsklassifizierung, so können noch weitere Aussagen bezüglich der vorgestellten Abhängigkeiten geschlussfolgert werden. Basierend auf den Komponententypen können nämlich lediglich bestimmte Abhängigkeitsklassen zwischen zwei Ressourcenkomponenten eines automatisierten Fertigungssystems auftreten. Räumliche und mechanische Abhängigkeiten können zwischen zwei Komponenten auftreten, wenn beide Komponenten entweder dem Kontextbereich oder dem Plattformbereich zuordenbar sind. Energetische Abhängigkeiten können zwischen zwei Komponenten innerhalb des Plattformbereichs auftreten, wenn beispielsweise eine Stromquelle verschiedene Bus- oder Steuergeräte versorgt. Hierbei ist zu beachten, dass Abhängigkeiten dieser Klasse auch zwischen Plattformkomponenten und Aktoren sowie Sensoren auftreten, da die beiden letztgenannten Komponententypen meist eine Energieversorgung benötigen, um funktionsfähig zu sein. Analog zu energetischen Abhängigkeiten können die infor-

mationstechnischen Abhängigkeiten auch zwischen zwei Plattformkomponenten auftreten sowie zwischen einer Plattformkomponente und einem Sensor oder Aktor. Grund hierfür ist, dass lediglich zwischen diesen Komponententypen ein Austausch von Informationen, Daten oder Signalen stattfinden kann. Logische Abhängigkeiten können zwischen Komponenten aus dem Softwarebereich sowie Komponentenbereich auftreten, da die Variablen rein virtuelle Größen oder Signale aus dem Feld sein können. Prozesstechnische Abhängigkeiten können zwischen Komponenten des Kontextbereichs einschließlich Sensoren und Aktoren auftreten, da mithilfe dieser Komponenten der technische Prozess umgesetzt wird.

4 Stand der Forschung und industrielle Praxis

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über den aktuellen Stand der Forschung in Bezug auf den ausgewählten Untersuchungsbereich dieser Arbeit (siehe Unterkapitel 2.4). Darüber hinaus findet eine kritische Bewertung der bestehenden Ansätze aus dem Stand der Forschung im Hinblick auf das Ziel und die gestellten Anforderungen dieser Arbeit (siehe Unterkapitel 2.4 und 2.5) statt. Aufgrund der zweigeteilten Zielsetzung dieser Arbeit werden die betrachteten Ansätze aus der Wissenschaft im weiteren Verlauf des Kapitels aufgeteilt in Ansätze, die für die Ermittlung des technischen Änderungsbedarfs genutzt werden (Unterkapitel 4.2), und in Ansätze, die sich mit der Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten befassen (Unterkapitel 4.3). Bevor jedoch auf die wissenschaftlichen Ansätze eingegangen wird, findet zunächst eine Betrachtung der industriellen Praxis bezüglich des Umgangs mit technischen Änderungen statt (Unterkapitel 4.1). Am Ende dieses Kapitels wird basierend auf den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Untersuchungen der aktuelle Handlungsbedarf abgeleitet (Unterkapitel 4.4).

4.1 Industrielle Praxis

Verschiedene Studien haben ergeben, dass die Thematik der technischen Änderung in der Industrie immer mehr an Bedeutung gewinnt [HYM03; KBH+15]. Der Fokus der meisten Unternehmen liegt hierbei aber eher auf dem Änderungsmanagement, was sich u.a. mit der Strukturierung, Organisation und Dokumentierung der Änderungen befasst [GRA13B]. Diesbezüglich gibt es auch für einzelne Branchen Empfehlungen von Verbänden, wie z.B. die Empfehlung des Verbandes der Automobilindustrie, die einen Änderungsmanagementprozess inklusive dazugehörige Dokumentationen für die Automobilbranche vorschlägt [VDA 4965]. Trotz der Empfehlungen und insbesondere in Branchen ohne solche Empfehlungen kann sich der Umgang mit technischen Änderungen in der Praxis von Unternehmen zu Unternehmen stark unterscheiden [HUMA99]. Die Unternehmen etablieren dabei meist einen eigenen internen Prozess einschließlich Dokumenten für das Management von aufkommenden Änderungen [GRA13B]. Es werden auch verschiedene kommerzielle Applikationen zur Unterstützung des Änderungsmanagements am Markt angeboten, die bei der Durchführung von bestimmten Aufgaben helfen, wie z.B. bei der Dokumentation von Fehlern und beim Erstellen eines Prozessablaufs für eine Änderung [GRA13A].

Obwohl es unterschiedliche Bemühungen gibt, den technischen Änderungsprozess systematisch auf einer organisatorischen Ebene handzuhaben, so existieren relativ wenige Anstrengungen in der Praxis die technischen Aktivitäten innerhalb des Engineerings oder der Änderungsprojekte von Fertigungssystemen zu systematisieren [CHR06]. Ein Beispiel dafür ist die Anforderungserhebung in der Praxis, wo meist aufgrund von hohem Zeitdruck die Anforderungen an das Zielsystem unsystematisch erhoben werden, was dazu führen kann, dass diese unvollständig und oder fehlerhaft sind [VFS+15]. Die Anforderungen sind jedoch wichtig für die Kommunikation sowie Zielerreichung von Engineering-Projekten [PORU09]. Bei technischen Änderungsprojekten stellen die ermittelten Änderungsbedarfe eine Art von Anforderungen an das zu ändernde System dar, die es zu erfüllen gilt. Darüber hinaus werden die erhobenen Anforderungen selten formal, z.B. in Form von Modellen, spezifiziert und können in unterschiedlichen Dokumenten vorliegen [SFT+11]. Im Falle von mechatronischen Systemen kann dies bedeuten, dass die Anforderungen in verschiedenen gewerkespezifischen Dokumenten oder Modellen vorliegen können [GSG+09]. Interdisziplinäre Dokumente oder Modelle, die die Sichten verschiedener Gewerke zusammenführen, sind in der Praxis noch nicht weit verbreitet [DRA10]. Dieser Umstand erschwert die Kommunikation zwischen den Gewerken und dementsprechend auch das Engineering von

mechatronischen Systemen, da es beim Engineering starke Abhängigkeiten zwischen den Gewerken gibt [HSF+13]. Aus Gesprächen mit der Industrie, die im Rahmen der Validierung dieser Arbeit geführt wurden, ging hervor, dass meist Gesprächsrunden sowie unkoordinierte, bilaterale Gespräche, die eigenständig von den Projektmitgliedern initiiert werden, die Grundlage des gewerkeübergreifenden Informationsaustausches sind. Diese Aussagen decken sich auch mit den Beobachtungen aus der Fachliteratur, wo beschrieben wird, dass die Kommunikation zwischen den Gewerken relativ unsystematisch abläuft und dies zu suboptimalen Ergebnissen führt [BESÄ10; HSF+13]. Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang ist die unsystematische Lösungsfindung, welche nicht auf Basis von formalisierten Modellen oder Spezifikationen ermittelt wird, sondern primär durch Diskussionen, Erfahrungswissen und Intuition [VFS+15]. Dementsprechend können die erzielten Ergebnisse stark von Fall zu Fall variieren.

Für das Engineering von technischen Systemen im Allgemeinen gibt es auch diverse Applikationen auf dem Markt wie beispielsweise die verschiedenen Computer-Aided Design (CAD) und Computer-Aided Engineering (CAE) Werkzeuge. Solche Werkzeuge sind jedoch meist spezialisiert für bestimmte Aufgaben der einzelnen Gewerke und bieten daher nicht den benötigten effizienten Informationsaustausch zwischen den Gewerken [HSF+13]. Für technische Änderungsprojekte werden häufig Softwareapplikationen wie SAP und Microsoft Excel genutzt, jedoch sind diese Applikationen für den Anwendungsfall recht suboptimal und in verschiedenen Aspekten limitiert, wie beispielsweise bezogen auf ihre Schnittstellen zu anderen Tools sowie die Möglichkeit der Änderungsanalyse [KBH+15].

Es kann dementsprechend zusammengefasst werden, dass gewisse Engineering-Prozesse, wie der technische Änderungsprozess, von mechatronischen Systemen in der Praxis teilweise noch sehr unsystematisch stattfinden, insbesondere bei Aktivitäten, die gewerkeübergreifend ausgeführt werden. Zwar gibt es am Markt unterschiedliche etablierte Applikationen, die das Änderungsmanagement oder gewerkespezifische Engineering-Aufgaben unterstützen, jedoch existieren keine etablierten Applikationen, die das gewerkeübergreifende Engineering für technische Änderungen unterstützen. Diese Umstände sind u.a. auf das Fehlen von interdisziplinären Modellen zurückzuführen. Dies erschwert die Kommunikation zwischen den Gewerken und das Etablieren eines systematischen Vorgehens oder einer Applikation. In der Fachliteratur werden für verschiedene Engineering-Prozesse interdisziplinäre Modelle vorgeschlagen (siehe Unterkapitel 4.2 und Unterkapitel 4.3), die sich jedoch bislang noch nicht in der Praxis durchgesetzt haben. Zwei der wesentlichen Gründe hierfür sind der hohe zeitliche Aufwand sowie der Mangel an qualifiziertem Personal für die Erstellung der Modelle [LAD18].

4.2 Ansätze zur Ermittlung des technischen Änderungsbedarfs

Um zu ermitteln, ob Produktionssysteme technische Änderungen benötigen, werden Informationen über die vorhandenen Produktionsmöglichkeiten sowie deren Limitationen benötigt. Anhand dieser Informationen kann geprüft werden, ob ein Produktionssystem geforderte Anforderungen erfüllen kann oder nicht. Im letzteren Falle würde ein Produktionssystem eine oder mehrere technische Änderungen benötigen, um die Anforderungen erfüllen zu können. In der Fachliteratur gibt es verschiedene Ansätze, die das Ziel verfolgen, diese Informationen für unterschiedliche Systeme zu modellieren. Im Kontext von Produktionssystemen werden diese Modelle häufig als Fähigkeitsmodelle bezeichnet (im Englischen Capability oder Skill Models) [JLL+12]. In [MBW+18] wird eine Fähigkeit im Kontext der Produktion wie folgt definiert:

Eine Fähigkeit ist das Vermögen eines technischen Systems eine Operation bzw. einen Prozess durchzuführen, um einen Effekt zur Unterstützung der Produktion zu erzielen.

Im Folgenden wird eine Auswahl von bestehenden Modellierungsansätzen vorgestellt und erläutert, die zur Ermittlung des Änderungsbedarfs an technischen Systemen verwendet werden können. Der Großteil der nachfolgend vorgestellten Fähigkeitsmodellierungsansätze basiert dabei auf der Beschreibung des technischen Prozesses von Produktionssystemen. Lediglich ein Ansatz, der im weiteren Verlauf vorgestellt wird, basiert nicht auf der Beschreibung des technischen Prozesses, sondern ist rein merkmalbasiert und berücksichtigt ebenfalls Produktmerkmale für die Fähigkeitsmodellierung. Die kritische Bewertung der Ansätze in Zusammenhang mit der Eingrenzung sowie Anforderungen dieser Arbeit findet im letzten der folgenden Unterkapitel statt.

4.2.1 Prozessbasierte Fähigkeitsmodellierungsansätze

Ansatz von Kitamura und Mizoguchi

Zu Beginn des Jahrtausends wurde von Kitamura und Mizoguchi in [KIMI04] ein Ansatz für die Modellierung von Fähigkeiten im Bereich der Produktion vorgestellt. Mithilfe einer Ontologie sollen dabei Änderungsprozesse von Systemen unterstützt werden. Der Ansatz beschreibt ein Fähigkeitsmodell, welches aus einer Verhaltensebene und einer Funktionsebene besteht. Die Verhaltensebene beschreibt den strukturellen Aufbau des Systems sowie der Subsysteme und wird mithilfe einer sog. erweiterten Geräteontologie (*Extended Device Ontology*) erstellt. Die Funktionsebene beschreibt die unterschiedlichen Funktionen eines Systems und wird auf Basis einer sog. funktionalen Konzeptontologie (*Functional Concept Ontology*) erzeugt. Hierbei werden Funktionen mit technischen Prozessen gleichgesetzt. Die Funktionsbeschreibungen aus der Ontologie werden mit den Subsystemen aus der Verhaltensebene verbunden, um die Verbindung zwischen dem „realen“ System und der funktionalen Ebene herzustellen. Für die Erstellung der Ontologien wurde die Applikation HoZo genutzt, die neben dem eigenen HoZo-Format auch noch weitere Formate unterstützt wie bspw. OWL oder CSV [KKI+02].

Ansatz von Järvenpää et al

Ein weiterer Fähigkeitsmodellierungsansatz, der ebenfalls Ontologien verwendet, wurde von Järvenpää et al. in [JLT16] vorgestellt. Die Fähigkeitsmodellierung soll dabei effiziente Analysen von Änderungsszenarien an Fertigungsressourcen ermöglichen. Der entwickelte Ansatz basiert auf einer Ontologie namens CoreOntology aus [LAN10], die Zusammenhänge zwischen Produkten und Prozessen beschreibt. Der Ansatz erweitert diese Ontologie um Beschreibungen von den Fähigkeiten von Ressourcen. Fähigkeiten sind hierbei ausführbare Prozesse und werden beschrieben durch einen Konzeptnamen (*Capability Concept Name*) sowie durch Merkmale (*Capability Parameter*). Des Weiteren unterscheidet der Ansatz zwischen simplen oder einfachen Fähigkeiten (*Simple Capability*) und kombinierten Fähigkeiten (*Combined Capability*), die aus simplen Fähigkeiten sowie anderen kombinierten Fähigkeiten bestehen können. Zusätzlich werden zu fertigende Produkte im Ansatz anhand von Merkmalen und einem Prozessplan beschrieben. Der Prozessplan beschreibt eine benötigte Sequenz an Fähigkeiten zur Fertigung des Produktes. Die Überprüfung, ob Ressourcen das zu fertigende Produkt erstellen können, wird anhand eines regelbasierten Vergleiches der beiden Beschreibungen ermittelt. Die Ontologien werden mithilfe der Web Ontology Language (OWL) beschrieben, wohingegen die Regeln mittels der SPARQL Inferencing Notation (SPIN) implementiert werden [JHS+18]. Außerdem wurde in diesem Zusammenhang ein systematisches Vorgehen für die Erstellung der Fähigkeitsontologie in [JSH+18B] vorgestellt. Der ontologiebasierte Fähigkeitsmodellierungsansatz wurde in den letzten Jahren zudem durch weitere Ontologien für die Produkt- und Ressourcenbeschreibung ergänzt [JSH+18A; JSL16].

Ansatz von Backhaus und Reinhart

In den vergangenen Jahren wurde für den Bereich der Montage ein Fähigkeitsmodellierungsansatz von Backhaus und Reinhart in [BARE15] vorgestellt. Hierbei soll die Modellierung bei der Programmierung von Montagesystemen unterstützen. Im Ansatz werden Montagefähigkeiten auf Basis der fünf allgemeinen Prozesse Lagern (*Store*), Bewegen (*Move*), Verbinden (*Connect*), Verändern (*Change*) und Vergleichen (*Compare*) beschrieben, die durch Merkmale von Eingangs- und Ausgabewerten spezifiziert werden. Da das Hauptziel der Modellierung darin besteht, die Programmierung von Montagesystemen zu unterstützen, repräsentieren die Eingabe- und Ausgabewerte Softwarevariablen. Produkte werden im Ansatz anhand von Geometrieinformationen sowie weiteren Merkmalen beschrieben und mit Prozessen verbunden, die das Produkt benötigt, um montiert zu werden. Die Modelle werden in AutomationML beschrieben [BARE15]. Auf Basis dieser Beschreibung kann ein Abgleich zwischen benötigten und vom Montagesystem bereitgestellten Prozessen stattfinden.

Ansatz von on Michniewicz und Reinhart

Ein weiterer Ansatz zur Modellierung von Montagefähigkeiten wurde von Michniewicz und Reinhart in [MIRE16] präsentiert. Die Fähigkeiten eines Montagesystems werden dabei als sog. Produktionsgraphen (*Production Graphs*) modelliert. Jeder Knoten des Graphen repräsentiert dabei ein sog. cyber-physisches Gerät (*Cyber-Physical Device*), welches verschiedene Montageprozesse ausführen kann, die durch Merkmale beschrieben werden. Die ungerichteten Kanten des Produktionsgraphen stellen die räumlichen Verbindungen zwischen den cyber-physischen Geräten dar. Produktanforderungen werden im Ansatz durch einen gerichteten Graphen, den sog. erweiterten Montageprioritätsplan (*Augmented Assembly Priority Plan*), beschrieben. Die Knoten des Graphen repräsentieren dabei benötigte Montageprozesse zur Fertigung des Produkts, wohingegen die Kanten die benötigte Montagereihenfolge darstellen. Durch den Abgleich der beiden Graphen wird im Ansatz ermittelt, ob ein Montagesystem ein angefordertes Produkt fertigen kann.

Ansatz von Ferreira und Lohse

In [FELO12] haben Ferreira und Lohse einen Fähigkeitsmodellierungsansatz für evolvierbare Montagesysteme vorgestellt. Der Ansatz beschreibt Montagefähigkeiten als Prozesse, die anhand von zwei Arten von Schnittstellen spezifiziert werden. Die erste Schnittstellenart, die als Steuerungsschnittstelle bezeichnet wird, beschreibt, welche Steuerungsbefehle der Prozess benötigt bzw. bereitstellen kann. Die zweite Schnittstellenart, genannt Parameterschnittstelle, beschreibt, welche Prozessgrößen die Montagefähigkeit benötigt. Eine Montagefähigkeit kann hierbei aus einem oder mehreren Prozessen bestehen. Produktanfragen werden in diesem Ansatz als sog. Fertigungsrezepte (*Skill Recipes*) beschrieben. Die Fertigungsrezepte bestehen dabei aus einer Sequenz von Montagefähigkeiten, die benötigt werden, um ein angefordertes Produkt herzustellen. Wie bei vorangegangenen Ansätzen wird auch hier durch einen Abgleich zwischen den angefragten und vom Montagesystem bereitgestellten Prozessen ermittelt, ob ein Montagesystem das angefragte Produkt herstellen kann oder eine technische Änderung benötigt wird. Eine Umsetzung der Modellierung in AutomationML stellten Danny et al. in [DFL+17] vor.

Ansatz nach Pfrommer et al.

Ein Ansatz zur Modellierung von Fertigungsfähigkeiten, der das PPR-Konzept nutzt, wurde von Pfrommer et al. in [PSA+15] eingeführt. Die Modellierung hat dabei das Ziel, die Rekonfiguration von Fertigungsmaschinen zu unterstützen. In dem Ansatz wird eine Fertigungsfähigkeit definiert als die Fertigkeit einer Ressource einen technischen Prozess ausführen zu können. Die Fähigkeitsgrenzen werden

dabei durch Prozessattribute definiert. Neben den Fähigkeiten werden im Ansatz außerdem Transformationen definiert, die die benötigten Prozesse zur Herstellung eines oder mehrere Produkte beschreiben, inklusive der dazu benötigten Eingangsprodukte. Auch Transformationen werden anhand von Prozessattributen spezifiziert. Für die Ermittlung des Änderungsbedarfs, im Sinne einer Rekonfiguration, werden die Prozesse aus den Transformationen mit den Prozessen der vorhandenen Fertigungsfähigkeiten abgeglichen. Wenn die benötigten Prozesse von Fertigungsfähigkeiten umgesetzt werden können, wird eine Aktion instanziiert, was eine konkrete Implementierung einer Fähigkeit darstellt. Wenn dies nicht der Fall ist, bedarf das Fertigungssystem einer Änderung.

Ansatz von Ramis et al.

Ein weiterer Fähigkeitsmodellierungsansatz, der das PPR-Konzept nutzt, wurde von Ramis et al. in [RAV+16] präsentiert. Im Ansatz wird eine Ressource unterteilt in Stationen, die wiederum in Komponenten untergliedert werden können. Des Weiteren können Stationen technische Prozesse ausführen, die aus weiteren Teilprozessen bestehen. Die Ausführung einzelner Teilprozesse wird dabei bestimmten Komponenten einer Station zugeordnet. Der Ansatz sieht zudem vor, dass die Produktbeschreibungen benötigte Prozesse benennen. Der vorgestellte Ansatz wurde in Form einer Ontologie im Resource Description Framework umgesetzt. Aufbauend darauf wurde die Semantic Web Rule Language genutzt, um Regeln zu erstellen für den Abgleich von benötigten Prozessen für die Fertigung eines Produkts mit von der Ressource bereitgestellten Prozessen. Auf Basis dieser Regeln kann bestimmt werden, ob die Ressource eine Produktionsanfrage erfüllen kann oder ob die Ressource technischer Änderungen bedarf.

4.2.2 Rein merkmalbasierter Ansatz zur Änderungsbedarfsermittlung von Karl

Ein rein merkmalbasierter Ansatz, der explizit auf die Ermittlung des Änderungsbedarfs bei Fertigungssystemen abzielt, wurde in [KAR14] vorgestellt. Im Ansatz werden ein Betriebsmittelanforderungsmodell und ein Betriebsmitteleigenschaftenmodell eingeführt. Ersteres beschreibt die Anforderungen an ein Fertigungssystem, die sich z.B. aus den Eigenschaften des zu fertigenden Produkts oder aus dem Fertigungsumfeld ergeben. Das zweitgenannte Modell soll hingegen die Fähigkeiten eines Fertigungssystems abbilden. Beide Modelle werden anhand von Merkmalleisten beschrieben. Hierbei werden die Merkmale in 25 unterschiedlichen „Kriterien“, wie beispielsweise Produktabmaße, Produktgeometrien, Medien, Produktionskosten oder Mitarbeiterqualifikation unterteilt. Diese Kriterien sind wiederum in die vier Gruppen *Produktbezogen*, *Produktionsstrukturbezogen*, *Betriebsmittelbezogen* und *Mitarbeiterbezogen* eingeteilt. Die Merkmale können quantitativer oder auch qualitativer Natur sein. Die Ausprägung der Merkmale kann nominal-, intervall- oder verhältnisskaliert abgebildet werden. Der Ansatz selbst gibt nur die 25 Kriterien vor und keine konkreten Merkmale für die Erstellung der Modelle. Die Merkmale sollen fallspezifisch ermittelt werden. Um den Modellierungsaufwand möglichst gering zu halten, erlaubt der Ansatz außerdem eine textuelle oder visuelle Abbildung von Kriterien, wie beispielsweise von komplexeren Produktgeometrien. Der Ansatz verlangt, dass das Betriebsmittelanforderungsmodell sowie das Betriebsmitteleigenschaftenmodell aus den gleichen Merkmalen bestehen. Für die Ermittlung des Änderungsbedarfs werden die Ausprägungen der beiden Merkmalleisten direkt miteinander abgeglichen. Wenn hierbei die Merkmalausprägungen des Betriebsmittelanforderungsmodells nicht von den Merkmalausprägungen des Betriebsmitteleigenschaftenmodells abgedeckt werden, benötigt das Fertigungssystem technische Änderungen bezüglich dieser identifizierten Merkmale. Für Kriterien, die textuell oder visuell beschrieben wurden, müssen Experten jeweils die Kriterienbeschreibungen miteinander abgleichen und entscheiden, ob ein Änderungsbedarf für das jeweilige Kriterium vorliegt.

4.2.3 Kritische Bewertung der Ansätze zur Änderungsbedarfsermittlung

Im Folgenden findet eine kritische Auseinandersetzung mit den zuvor vorgestellten Ansätzen statt. Hierbei werden die konzeptionellen Vor- und Nachteile sowie Limitationen der Ansätze diskutiert. Darüber hinaus werden die Ansätze hinsichtlich der in dieser Arbeit getroffenen Eingrenzungen sowie Anforderungen (siehe Kapitel 2) analysiert und bewertet.

Obwohl die vorgestellten prozessbasierten Fähigkeitsmodellierungsansätze für unterschiedliche Zielsetzungen und Einsatzdomänen entwickelt wurden, besitzen sie aufgrund der Fokussierung auf den technischen Prozess ähnliche konzeptionelle Vor- und Nachteile. Einer der Vorteile der prozessbasierten Fähigkeitsmodellierung ist, dass die Modelle für das technische Personal relativ gut zugänglich sind, da das Personal häufig auf der Prozessebene arbeitet und über ein detailliertes Prozesswissen verfügt. Dementsprechend kann das technische Personal bei der Erstellung der Modelle sein domänenspezifisches Prozesswissen direkt artikulieren und abbilden. Bei den vorgestellten Ansätzen, in denen die Modelle als Ontologien beschrieben werden, benötigt das technische Personal jedoch für die Modellerstellung spezielles Fachwissen bezüglich Ontologien oder Ontologie-Experten, die es bei der Erstellung unterstützen. Die prozessbasierte Fähigkeitsmodellierung benötigt für den Abgleich zwischen Produktanforderungen und Ressourcenfähigkeiten, dass die Produktanforderungen in Form von Prozesssequenzen ausspezifiziert sind. Hierdurch können diverse Nachteile entstehen, insbesondere in Konstellationen, in denen die Produktentwicklung und –herstellung von getrennten Personenkreisen durchgeführt wird [HHF18#]. Daraus können nach [HHF18#] folgende Nachteile resultierenden. Aufgrund der Kernkompetenz der Produktentwickler besteht die Gefahr, dass gute oder optimale Herstellungsprozesse bei der Produktanforderungserstellung nicht berücksichtigt werden, wenn Produktentwickler die Produktanforderungen auf Basis von technischen Prozessen beschreiben müssen. Die Kernkompetenz eines Produktentwicklers besteht darin, ein Produkt zu entwickeln, das die Anforderungen seiner Kunden bestmöglich erfüllt. Um die notwendigen Produktanforderungsbeschreibungen in prozessbasierten Ansätzen zu erstellen, benötigt der Produktentwickler jedoch gute bis sehr gute Kenntnisse über die möglichen Herstellungsprozesse, was nicht immer gegeben ist. Hierdurch könnten suboptimale Herstellungsprozesse ausgewählt werden. Um dies zu vermeiden, ist potentiell ein hoher Kommunikationsaufwand zwischen den Produktentwicklern und dem Produkthersteller notwendig. Grund hierfür ist, dass die Produkthersteller das Expertenwissen über ihre Produktionsprozesse besitzen, jedoch meist wenig über die genauen Anforderungen und Zielsetzungen des zu produzierenden Produkts wissen, die vom Kunden des Produktentwicklers gestellt werden. Um diese Informationsasymmetrie auszugleichen, kann es dementsprechend zu einem erhöhten Kommunikationsaufwand kommen. Erschwerend kommt hinzu, dass Prozessbeschreibungen eine hohe Komplexität besitzen können. Beispielsweise werden in [DIN 8580] über 140 Arten von Fertigungsprozessen klassifiziert. Diese Fertigungsprozessarten werden zum Teil in 52 Unternormen detaillierter beschrieben. Betrachtet man noch zusätzlich die Anzahl der verschiedenen Merkmale, die die Fertigungsprozesse spezifizieren, können prozessbasierte Fähigkeits- und Produktanforderungsmodelle rasch an Komplexität zunehmen. Diese hohe Komplexität kann wiederum einen negativen Einfluss auf die Effizienz des Abgleichprozesses zwischen Anforderungen und Fähigkeiten haben. Ein weiteres Problem in diesem Zusammenhang ist die effiziente Erstellung der benötigten Produktanforderungsbeschreibungen. Um eine hohe Anzahl von Produktionsressourcen, die die Produktanforderungen erfüllen, ermitteln zu können, muss eine möglichst hohe Vielfalt an unterschiedlichen Prozesssequenzen erstellt werden. Dies bedeutet, dass für ein zu fertigendes Produkt mehrere und im optimalen Fall alle möglichen Prozesssequenzen beschrieben werden müssen. Dementsprechend ist es fraglich, ob die prozessbasierten

Ansätze im Falle von kleinen Losgrößen und sich rasch ändernden Produktvarianten sowie nicht wiederkehrenden Aufträgen effizient angewendet werden können. Auch die Einführung von neuen Fertigungsprozessen würde prozessbasierte Ansätze vor eine Herausforderung stellen, da alle bestehenden Produktanforderungsbeschreibungen überprüft und ggf. überarbeitet werden müssten. [HHF18#]

Der rein merkmalbasierte Ansatz von Karl besitzt den Vorteil, dass die Anforderungen mit wenigen Ausnahmen als einfache Merkmalleisten dargestellt werden, wodurch es einfach verständlich ist. Außerdem werden im Ansatz ebenfalls produktbezogene Merkmale berücksichtigt, wodurch ein Produktentwickler die Anforderungen relativ leicht beschreiben kann. Ein Nachteil des Ansatzes ist, dass neben den produktbezogenen Merkmalen auch betriebsmittelbezogene Merkmale bei der Anforderungsformulierung angegeben werden müssen. Dies kann, ähnlich wie bei den prozessbasierten Ansätzen, zu einem hohen Kommunikationsaufwand zwischen den Produktentwicklern und Produktherstellern führen, wenn Produktentwickler nur wenige Informationen über die Betriebsmittel des Produktherstellers haben. Darüber hinaus benötigt der Ansatz einen Merkmalkatalog, der zwischen den Produktentwicklern und Produktherstellern abgestimmt ist, als semantische Basis der Anforderungsbeschreibung. Ohne einen solchen Merkmalkatalog besteht die Gefahr, dass z.B. doppeldeutige Merkmale oder nicht verständliche Merkmale genutzt werden, was wiederum zu Kommunikationsproblemen führt.

Bezüglich der getroffenen Eingrenzungen in dieser Arbeit wurde lediglich der merkmalbasierte Ansatz zur Änderungsbedarfsermittlung nach Karl für einen sehr ähnlichen Untersuchungsbereich erstellt. Dementsprechend könnte der Ansatz nach Karl auch für den eingegrenzten Bereich dieser Arbeit relativ problemlos genutzt werden. Die restlichen vorgestellten Ansätze wurden ursprünglich für einen anderen aber zum Teil ähnlichen Untersuchungsbereich entwickelt und könnten auch potentiell mit teilweise geringen Anpassungen für den festgelegten Bereich dieser Arbeit angewendet werden. Beispielsweise kann der Ansatz von Järvenpää et al. ohne große Anpassung auch für die Ermittlung des Änderungsbedarfs von Maschinen sowie deren Baugruppen in der Betriebsphase genutzt werden. Hinsichtlich der getroffenen Eingrenzung, dass Anpassungen auf Merkmalebene betrachtet werden, benötigt der Ansatz keine Anpassung, da die Systemelemente bereits anhand von Merkmalen beschrieben sind. Gleiches gilt für die vorgestellten Fähigkeitsmodellierungsansätze von Pfrommer et al. und Ramis et al. Auch sie könnten theoretisch für die Ermittlung des Änderungsbedarfs von Maschinen sowie deren Baugruppen in der Betriebsphase auf Merkmalebene genutzt werden. Der Ansatz von Kitamura und Mizoguchi hingegen würde eine prozessbasierte Anforderungsbeschreibung benötigen, um Änderungsbedarfe von Maschinen sowie deren Baugruppen in der Betriebsphase auf Merkmalebene ermitteln zu können. Die präsentierten Fähigkeitsmodellierungsansätze für Montageprozesse könnten auch potentiell für die Ermittlung des Änderungsbedarfs innerhalb des in dieser Arbeit eingegrenzten Untersuchungsbereichs genutzt werden. Jedoch müsste hierbei noch untersucht werden, inwiefern diese Ansätze auch auf andere Arten von Fertigungsmaschinen angewendet werden können. Der Ansatz von Backhaus und Reinhart müsste zudem noch für die Modellierung von hardwaretechnischen Aspekten der Systeme erweitert werden, da der Fokus des Ansatzes aktuell auf der Software von Montagesystemen liegt.

Die Bewertung der vorgestellten Ansätze hinsichtlich der Erfüllung der gestellten Anforderungen (siehe Unterkapitel 2.5) für die Erreichung des ersten Teilziels dieser Arbeit (siehe Unterkapitel 2.4) wird in Tabelle 4-1 dargestellt. Hierbei werden Harvey-Bälle genutzt, um darzustellen, ob eine Anforderung nicht, teilweise oder vollständig von einem Ansatz erfüllt wird. In der Tabelle ist zu erkennen, dass der Ansatz von Kitamura und Mizoguchi die Anforderung 1 bezüglich des Fähigkeitsmodells zur Abbildung von automatisierten Fertigungssystemen, welches auch eine systematische Ermittlung des Änderungsbedarfs ermöglichen soll, nur teilweise erfüllt. Grund dafür ist, dass im Ansatz zum Fähigkeitsmodell

kein dazugehöriges Anforderungsmodell vorgestellt wird, was keine systematische Änderungsbedarfsermittlung ermöglicht. Auch der Ansatz von Backhaus und Reinhart erfüllt die Anforderung 1 nur teilweise, da das entwickelte Fähigkeits- und Anforderungsmodell nur für Softwareaspekte anwendbar ist. Anforderung 2 wird von keinen der vorgestellten prozessbasierten Fähigkeitsmodellierungsansätzen erfüllt, da diese Ansätze Prozesse als Anforderungsbeschreibung benötigen. Lediglich der Ansatz von Karl erfüllt diese Anforderung teilweise, da in seinem Ansatz neben den betriebsmittelbezogenen Merkmalen auch produktbezogene Merkmale berücksichtigt werden. Des Weiteren ist in der Tabelle 4-1 abgebildet, dass der Ansatz von Michniewicz und Reinhart die Anforderung 5 bezüglich eines offenen und maschinen-interpretierbaren Formats für die benötigten Modelle nicht erfüllt. Grund hierfür ist, dass für die Modelle im Ansatz lediglich eine graphische Darstellungsform präsentiert wird. Ein offenes und maschinen-interpretierbares Format, welches automatisiert auswertbar ist, wird für die entwickelten Modelle nicht vorgestellt. Gleiches gilt für die Modelle im Ansatz von Karl, in dem ausschließlich eine graphische Repräsentation der Merkmalleisten vorgestellt wird. Zudem erlaubt der Ansatz auch eine textuelle und visuelle Beschreibung von gewissen Merkmalen bzw. Kriterien, was eine automatisierte Auswertbarkeit der Modelle zusätzlich erschwert. In Tabelle 4-1 ist außerdem deutlich zu erkennen, dass keiner der vorgestellten Ansätze die Anforderung 6 bezüglich der systematischen Verknüpfung des Fähigkeitsmodells mit einem Abhängigkeitsmodell vollständig erfüllt. Der Grund hierfür ist, dass bis auf den Ansatz von Karl, die vorgestellten Ansätze keine Abhängigkeitsmodelle vorsehen. Infolgedessen würden diese Ansätze nur eine eingeschränkte Lösungsfindung von technischen Änderungen erlauben. Diese Lösungsfindung würde sich dabei auf die einfache Substitution einzelner Maschinen und Baugruppen begrenzen. Weiterführende Analysen wie beispielsweise, ob die Fähigkeiten der Maschine oder der Baugruppe aufgrund von räumlichen oder softwaretechnischen Abhängigkeiten beschränkt sind und dementsprechend eine andere räumliche Anordnung oder Softwareparametrierung benötigen, können mit diesen Ansätzen nicht durchgeführt werden. Obwohl der Ansatz von Karl explizit ein Abhängigkeitsmodell vorsieht (siehe Unterkapitel 4.3), erfüllt der Ansatz die Anforderung 6 nur teilweise, da die Verknüpfung zwischen dem Fähigkeitsmodell und dem Abhängigkeitsmodell unsystematisch verläuft. Der Ansatz sieht hierbei vor, dass die ermittelten Merkmale bzw. Kriterien, die einer Änderung bedürfen, von einem Experten bestimmten Maschinen bzw. deren Komponenten zugewiesen werden. Auf Basis dieser manuellen und individuell durchgeführten Zuweisung kann dann erst die Abhängigkeitsanalyse sowie Lösungsfindung in den nächsten Schritten des Ansatzes stattfinden.

Tabelle 4-1 Bewertung der vorgestellten Ansätze zur Änderungsbedarfsermittlung

		Anforderung 1	Anforderung 2	Anforderung 5	Anforderung 6
Prozessbasiert	Kitamura und Mizoguchi	◑	○	●	○
	Järvenpää et al.	●	○	●	○
	Backhaus und Reinhart	◑	○	●	○
	Michniewicz und Reinhart	●	○	○	○
	Ferreira und Lohse	●	○	●	○
	Pfrommer et al.	●	○	●	○
	Ramis et al.	●	○	●	○
Merkmalbasiert	Karl	●	◑	○	◑

○ Nicht erfüllt ◑ Teilweise erfüllt ● Vollständig erfüllt

Anhand der vorangegangenen Ausführungen ist ersichtlich, dass keiner der diskutierten Ansätze die gestellten Anforderungen dieser Arbeit für ein Modell zur automatisierten Ermittlung des Änderungsbedarfs auf Merkmalebene an automatisierten Fertigungsmaschinen vollständig erfüllt. Zudem wurde dargelegt, dass die meisten vorgestellten Ansätze noch gewisse konzeptionelle Defizite bezüglich der Effizienz des Abgleichprozesses zwischen Fähigkeiten und Anforderungen besitzen. Der sich aus diesen Erkenntnissen ableitbare Handlungsbedarf wird in Unterkapitel 4.4 detailliert diskutiert.

4.3 Ansätze zur Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten

In den vergangenen Jahrzehnten entstanden viele Forschungsarbeiten im Kontext des Engineering Change, die sich mit technischen Änderungen hinsichtlich verschiedener Aspekte befasst haben. Diese Forschungsarbeiten kann man dabei nach [OYL04] in erläuternde Forschungsarbeiten, organisatorische Lösungen und technische Lösungen einordnen. Forschungsarbeiten aus der erstgenannten Kategorie versuchen ein gemeinsames Verständnis vom technischen Änderungsprozess zu erarbeiten und die dazugehörigen Probleme zu identifizieren. Forschungsarbeiten aus der zweitgenannten Kategorie befassen sich primär mit unternehmensstrategischen und –organisatorischen Aspekten, um das Management von technischen Änderungsprozessen zu optimieren. Die letztgenannte Kategorie beinhaltet Forschungsarbeiten, die sich mit der Rückverfolgung sowie der Analyse der technischen Auswirkungen von Änderungen befassen. Diese Forschungsarbeiten können wiederum in die Kategorien Rückverfolgbarkeit und Änderungsauswirkungsanalyse unterteilt werden. [OYL04]

Ansätze für Engineering Change, die sich mit der Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten befassen, sind hauptsächlich der Kategorie der Änderungsauswirkungsanalyse zugeordnet. In [AWC13] wurden diese Ansätze nochmals auf Basis ihrer primär betrachteten Systemelemente in kom-

ponentenbasierte und merkmalbasierte Ansätze unterteilt. Die beschriebene Kategorisierung ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Außerhalb des Engineering Change gibt es noch weitere Ansätze aus dem Bereich Produktdesign und vereinzelte Manufacturing Change Ansätze für die Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten. Jedoch können auch diese Ansätze anhand der beschriebenen Kategorisierung in komponentenbasierte und merkmalbasierte Ansätze unterteilt werden. Im Folgenden wird eine Auswahl von bestehenden Ansätzen aus der Fachliteratur für die Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten vorgestellt und erläutert. Hierbei werden zunächst die komponentenbasierten Ansätze in Unterkapitel 4.3.1 vorgestellt. Im darauffolgenden Unterkapitel 4.3.2 folgt dann die Vorstellung der merkmalbasierten Ansätze. Abschließend werden die Ansätze im letzten Unterkapitel 4.3.3 hinsichtlich ihrer konzeptionellen Vor- und Nachteile sowie der in dieser Arbeit definierten Eingrenzung und Anforderungen kritisch analysiert und bewertet.

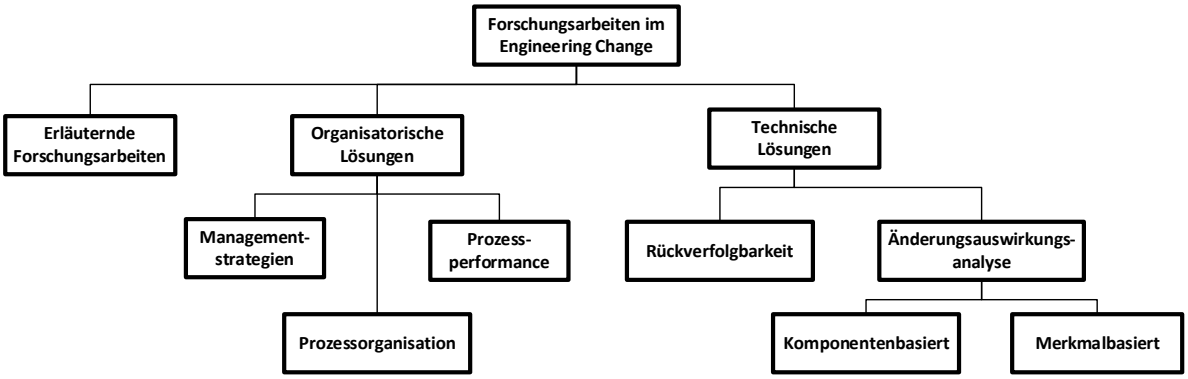

Abbildung 4-1 Kategorien von Forschungsarbeiten im Engineering Change nach [OYL04] und [AWC13]

4.3.1 Komponentenbasierte Ansätze

Die Grundlage von komponentenbasierten Ansätzen sind meist Modelle, die Abhängigkeiten zwischen Systemkomponenten beschreiben. Häufig werden die Abhängigkeiten dabei als qualitative Ausprägungen oder Wahrscheinlichkeiten beschrieben. Die bevorzugte Darstellungsform in den Ansätzen sind Matrizen, die dafür genutzt werden, um die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten zu modellieren. Ein vielzitierter Ansatz in dieser Kategorie wurde von Clarkson et al. entwickelt und in [CSE04] vorgestellt. Der Ansatz befasst sich mit der Auswirkungsanalyse von technischen Änderungen an komplexen Produkten. Hierbei werden die Abhängigkeiten zwischen den Produktkomponenten, z.B. Motor, Netzteil und Gehäuse, als Ausbreitungswahrscheinlichkeit (*Propagation Likelihood*) und Auswirkungswert (*Impact Value*) beschrieben. Ersteres repräsentiert die Wahrscheinlichkeit einer Fortpflanzung der Änderung zwischen zwei Komponenten. Im Vergleich dazu beschreibt der Auswirkungswert den Aufwand bzw. die Kosten der möglichen Änderung. Beide Abhängigkeiten werden in separaten Design Structure Matrizen (DSMs) modelliert. Aus den beiden DSMs werden anschließend Änderungsrisikowerte kalkuliert, auf deren Basis die Auswirkungen einer technischen Änderung abgeschätzt werden. Der Ansatz von Clarkson et al. wurde in einer aktuelleren Arbeit von Koh et al. in [KCC+18] aufgegriffen und bezüglich der zu wählenden Systemgrenzen der Modellierung optimiert.

Ein ähnlicher Ansatz für die Auswirkungsanalyse von technischen Änderungen an Produkten wurde von Tang et al. in [TYU18] vorgestellt. Ziel des Ansatzes ist es, in der Entwurfsphase für verschiedene absehbare Änderungen die Änderungsauswirkungen auf ein Produkt zu analysieren, um auf dieser Basis das Produktdesign zu optimieren. Als Betrachtungsgrößen werden dabei die von Clarkson et al.

eingeführten DSMs bezüglich der Ausbreitungswahrscheinlichkeit und des Auswirkungswerts sowie die Zeit, die für die Konstruktion von Komponenten benötigt wird, berücksichtigt. Anhand dieser Größen werden verschiedene Änderungsausbreitungspfade ermittelt, die mit einem Änderungsrisiko und einer Änderungszeit beschrieben werden.

Einer der wenigen Ansätze zur Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten, im Kontext des Manufacturing Change, wurde von Karl entwickelt und in [KAR14] beschrieben. Hierbei ist zu erwähnen, dass der vorgestellte Ansatz zur Änderungsbedarfsermittlung von Karl (siehe Unterkapitel 4.2.2) zwar auf Merkmalen basiert, sein Ansatz zur Änderungsmöglichkeitsgenerierung jedoch komponentenbasiert ist. Wie bereits in Unterkapitel 4.2.3 beschrieben, werden die beiden Ansätze auf Basis von Expertenwissen manuell miteinander verknüpft. Im komponentenbasierten Ansatz zur Generierung von Änderungsmöglichkeiten werden Abhängigkeiten zwischen Bauteilen in die sieben Kategorien mechanisch, informationstechnisch, elektrisch, fluidtechnisch, thermisch, logisch und funktional unterteilt. Für jede dieser Abhängigkeitskategorien wird eine DSM erstellt. Die Abhängigkeiten werden dabei mit Werten zwischen eins und drei beschrieben, die qualitativ den Aufwand zum Lösen und Wiederherstellen der Abhängigkeit repräsentieren. Anhand der Matrizen werden für verschiedene Initialänderungen an Bauteilen sog. Rekonfigurationsgraphen erstellt, die technische Änderungsmöglichkeiten darstellen. Hierbei werden die Initialänderungen von Experten manuell ermittelt, auf Basis der vorgestellten Änderungsbedarfsanalyse in Unterkapitel 4.2.2. Auch bei der Erstellung des restlichen Rekonfigurationsgraphen sieht der Ansatz an bestimmten Stellen die manuelle Eingabe von Expertenwissen vor. Beispielsweise muss ein Experte entscheiden, ob und wie ein Bauteil aufgrund einer Abhängigkeit zu einem Bauteil aus einer vorangegangenen technischen Änderung angepasst werden muss oder ob zukünftige technische Änderungen in die aktuelle technische Änderung integriert werden können. Die Knoten des Rekonfigurationsgraphen repräsentieren das zu ändernde Bauteil und besitzen zusätzliche Informationen sowie eine textuelle Änderungsbeschreibung. Die gerichteten Kanten des Graphen notieren die Änderungsursachen und -fortpflanzungen der Bauteile. Die generierten Änderungsmöglichkeiten werden anschließend noch anhand technischer und wirtschaftlicher Kriterien bewertet.

Ein weiterer Ansatz, der sich mit Manufacturing Change befasst, wurde von Olmez et al. in [OHB+18] dargelegt. Der Ansatz befasst sich mit der Änderungsauswirkungsanalyse von Produktionssystemen mit dem Ziel, Strategien und Lösungsvorschläge zur Unterstützung des Systementwurfs bereitzustellen. Hierbei werden Abhängigkeiten zwischen Komponenten bzw. Elementen aus den Bereichen Anforderung, Produkt, Prozess und Organisation in einer Multiple Domain Matrix (MDM) modelliert. Anhand der MDM wird die oben beschriebene Methode von Clarkson et al. verwendet, um Änderungspfade mit Änderungsrisikowerten zu ermitteln. Auf Basis dessen werden dann Entscheidungen bezüglich der zu ändernden Komponenten bzw. Elemente getroffen.

4.3.2 Merkmalbasierte Ansätze

Im Gegensatz zu den komponentenbasierten Ansätzen modellieren merkmalbasierte Ansätze Abhängigkeiten zwischen Systemmerkmalen. Das Ziel der Ansätze ist dabei, die Auswirkung von technischen Änderungen bis auf spezifische Merkmale aufzuschlüsseln, um detaillierte Aussagen treffen zu können. Dementsprechend beinhaltet diese Kategorie, neben Ansätzen, die Abhängigkeiten qualitativ beschreiben, auch Ansätze, die Abhängigkeiten quantitativ abbilden, um eine möglichst konkrete Aussage über die technischen Änderungen treffen zu können.

Ein merkmalbasierter Ansatz aus dem Bereich des Produktdesigns, der Abhängigkeiten quantitativ modelliert, wurde beispielsweise von Yang und Duan in [YADU12] präsentiert. Ziel des Ansatzes ist es, Produktdesigner bei der Ermittlung von Änderungsmöglichkeiten für eine angefragte Änderung zu unterstützen. Hierbei werden die Abhängigkeiten zwischen den Produktmerkmalen als algebraische Funktionen beschrieben. Die Merkmale sowie Abhängigkeiten werden als Knoten in einem gerichteten Graphen abgebildet. Die Kanten im Graphen visualisieren, welche Merkmale in den jeweiligen algebraischen Funktionen betroffen sind. Auf Basis des Graphen und einer vorgegebenen Initialänderung werden unterschiedliche Änderungspfade ermittelt, die mögliche Änderungslösungen für das Produkt repräsentieren.

Ein anderer merkmalbasierter Ansatz aus dem EC-Kontext wurde von Hamraz in [HAM13] vorgestellt. Der Ansatz verwendet eine MDM, um Abhängigkeiten zwischen Merkmalen zu modellieren. Die Merkmale sind dabei unterteilt in die Bereiche Struktur, Verhalten und Funktion. Der Strukturbereich beinhaltet dabei z.B. Merkmale bezüglich der Geometrie oder des Materials. Der Verhaltensbereich enthält Merkmale bezüglich der physikalischen Wirkprinzipien des Produkts. Der Funktionsbereich hingegen beinhaltet die Merkmale, die die Funktionen des Produkts beschreiben. Die Abhängigkeiten werden mit Änderungswahrscheinlichkeiten beschrieben. Auf Basis der MDM werden bereichsübergreifende Änderungspfade ermittelt, die unterschiedliche Änderungsmöglichkeiten repräsentieren.

Ein aktuellerer Ansatz, der Änderungswahrscheinlichkeiten bei technischen Produktänderungen ermittelt, wurde von Zheng et al. in [ZYZ19] präsentiert. Im Ansatz wird eine graphenbasierte Darstellung der Produkte gewählt, in der die Knoten Produktmerkmale repräsentieren und die gerichteten Kanten die wahrscheinlichkeitsbehafteten Änderungsabhängigkeiten zwischen den Produktmerkmalen abbilden. Anhand des Graphen werden dann für vorgegebene Initialänderungen wahrscheinlichkeitsbehaftete Änderungspfade für das zu ändernde Produkt bestimmt.

Ein weiterer aktueller Ansatz aus dem EC-Kontext wurde von Brahma und Wynn in [BRWY18] veröffentlicht. Der Ansatz basiert auf den Inhalten aus [AWC13] und umfasst vier unterschiedliche Ebenen. Die erste Ebene besteht aus Anforderungen an ein Produkt. Diese Anforderungen sind mit Funktionen auf der zweiten Ebene verbunden. Die Funktionen sind mit Komponenten (3. Ebene) verbunden, und diese sind wiederum mit Teilproblemen (4. Ebene), die anhand von Merkmalen ausspezifiziert sind, verknüpft. Auf Basis dieser Zusammenhänge werden ausgehend von gestellten Anforderungen merkmalbasierte Änderungsmöglichkeiten generiert.

Ein merkmalbasierter Ansatz, der aus dem Produktdesignbereich stammt, jedoch gewisse Schnittmengen zum MC aufweist, wurde von Siddharth und Sarkar in [SISA18] vorgestellt. Der Ansatz dient dazu technische Änderungen am Produkt, basierend auf geschätzten Änderungskosten, bewerten zu können. In diesem Ansatz werden Änderungsauswirkungen mittels einer MDM analysiert, die Abhängigkeiten zwischen Produkt- und Produktionssystemmerkmalen abbildet. Die Abhängigkeiten werden dabei qualitativ mit Kostengewichten beschrieben. Abhängigkeiten innerhalb des Produktionssystems werden im Ansatz nicht berücksichtigt.

4.3.3 Kritische Bewertung der vorgestellten Ansätze

Im Folgenden findet eine kritische Auseinandersetzung mit den zuvor vorgestellten Ansätzen für die Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten statt. Analog zu Unterkapitel 4.2.3 werden hierbei zunächst die konzeptionellen Vor- und Nachteile sowie Limitationen der vorgestellten Ansätze diskutiert. Anschließend findet die Bewertung der Ansätze hinsichtlich der in dieser Arbeit getroffenen Eingrenzungen sowie Anforderungen statt.

Aufgrund der Betrachtung von Komponenten können die vorgestellten komponentenbasierten Ansätze auf Basis ihrer Abhängigkeitsmodelle keine konkreten technischen Änderungsoptionen bereitstellen. Grund hierfür ist, dass technische Änderungen an einer Komponente je nach zu änderndem Komponentenmerkmal zu unterschiedlichen Folgeänderungen führen können [REMO09]. Damit konkrete Änderungsmöglichkeiten bestimmt werden können, sieht beispielsweise der Ansatz von Karl die zusätzliche Eingabe von Expertenwissen vor. Die anderen vorgestellten komponentenbasierten Ansätze, die Abhängigkeiten anhand von Ausbreitungswahrscheinlichkeiten beschreiben, sehen keine weiteren Eingaben von Expertenwissen vor, da das primäre Ziel dieser Ansätze die Bereitstellung einer qualitativen Entscheidungsgrundlage hinsichtlich der Auswirkungen einer Änderung ist. Bezüglich der Generierung von Änderungsmöglichkeiten bedeutet dies jedoch, dass diese Ansätze lediglich Änderungsmöglichkeiten bereitstellen, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine Lösung für eine Änderungsanfrage darstellen. Der primäre Vorteil der komponentenbasierten Ansätze liegt im verhältnismäßig geringen Modellierungsaufwand. Im Vergleich zu den merkmalbasierten Ansätzen ist die Anzahl der Elemente in den Abhängigkeitsmodellen bei komponentenbasierten Ansätzen meist ein Vielfaches geringer. Der Grund hierfür ist, dass Komponenten durch verschiedene Merkmale spezifiziert werden. Des Weiteren beschreiben die komponentenbasierten Ansätze Abhängigkeiten häufig qualitativ, was sich ebenfalls positiv auf den Modellierungsaufwand auswirkt.

Merkmalbasierte Ansätze besitzen den Vorteil gegenüber komponentenbasierten Ansätzen, dass sie auf Basis ihrer Abhängigkeitsmodelle konkretere technische Änderungsmöglichkeiten generieren können, da direkt ermittelt werden kann, welche Systemmerkmale geändert werden müssen. Jedoch können auch in dieser Kategorie die Ansätze, die Abhängigkeiten als Wahrscheinlichkeiten beschreiben, lediglich Änderungsmöglichkeiten generieren, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine Lösung für eine Änderungsanfrage darstellen. Der wesentliche Nachteil von merkmalbasierten Ansätzen ist der Modellierungsaufwand aufgrund der großen Anzahl an Merkmalen sowie des Detaillierungsgrades der benötigten Informationen. Hierbei besitzen insbesondere Ansätze, die Abhängigkeiten quantitativ beschreiben, einen sehr hohen Modellierungsaufwand, da die benötigten Abhängigkeitsinformationen nur durch detaillierte Analysen des Systems gewonnen werden können. Im Vergleich dazu ist der Modellierungsaufwand bei den merkmalbasierten und wahrscheinlichkeitsbehafteten Ansätzen geringer, jedoch ist auch hier der Aufwand im Verhältnis zu komponentenbasierten Ansätzen noch relativ hoch aufgrund der großen Anzahl der Merkmale.

Hinsichtlich der in dieser Arbeit getroffenen Eingrenzung ist zu erwähnen, dass lediglich die Ansätze von Karl sowie Olmez et al. für das MC entwickelt worden sind. Demzufolge liegt der Betrachtungsfokus der beiden Ansätze auf Fertigungssystemen als Änderungsobjekt, was mit dem Untersuchungsbereich der vorliegenden Arbeit übereinstimmt. Hierbei betrachtet der Ansatz von Olmez et al. jedoch Änderungen auf Fabrikebene und nicht auf Maschinen- oder Baugruppenebene. Der Ansatz von Karl hingegen betrachtet Änderungen an Betriebsmitteln sowie deren Baugruppen, was der Maschinen- bzw. Baugruppenebene entspricht, und besitzt diesbezüglich den gleichen Betrachtungsfokus wie die vorliegende Arbeit. Die anderen Ansätze wurden für den EC-Kontext entwickelt oder stammen aus dem Bereich des Produktdesigns und haben dementsprechend einen produktorientierten Fokus bezüglich des zu ändernden Systems. Alle vorgestellten Ansätze könnten prinzipiell auf Systeme angewendet werden, die sich bereits in ihrer Betriebsphase befinden. Merkmalbasierte Ansätze besitzen bezüglich der Eingrenzung der zu ändernden Fähigkeitsart den gleichen Fokus wie die vorliegende Arbeit und könnten in dieser Hinsicht potentiell für die Problemstellung genutzt werden. Der Betrachtungsfokus der vorgestellten komponentenbasierten Ansätze liegt meist nicht auf den Änderungen von Merkmalen. Deshalb sind diese Ansätze nicht ohne Anpassungen auf das eingegrenzte Problem

anwendbar. Einzige Ausnahme hierbei ist der Ansatz von Karl, der mithilfe von zusätzlichen Expertenwissen Änderungsmöglichkeiten auf Merkmalebene generiert.

Analog zu Unterkapitel 4.2.3 wird das Bewertungsergebnis der vorgestellten Ansätze hinsichtlich der Erfüllung der gestellten Anforderungen (siehe Unterkapitel 2.5) für die Erreichung des zweiten Teilziels dieser Arbeit (siehe Unterkapitel 2.4) in Tabelle 4-2 dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass Anforderung 3 bezüglich eines Abhängigkeitsmodells, welches es erlaubt systematisch Änderungsmöglichkeiten am Fertigungssystem auf Merkmalebene zu bestimmen, von den komponentenbasierten Ansätzen von Clarkson et al. und Tang et al. nicht erfüllt wird. Grund hierfür ist, dass diese beiden Ansätze weder Abhängigkeitsmodelle auf Merkmalebene noch für Fertigungssysteme besitzen. Die beiden komponentenbasierten Ansätze von Olmez et al. und Karl erfüllen hingegen diese Anforderung teilweise, da die Abhängigkeitsmodelle zwar Änderungen an Fertigungssystemen berücksichtigen, jedoch nicht direkt auf Merkmalebene. Hierbei ist zu erwähnen, dass beim Ansatz von Karl zwar letzten Endes Änderungsmöglichkeiten auf Merkmalebene generiert werden, dies jedoch durch manuelle und individuelle Analysen geschieht, die nicht direkt auf dem Abhängigkeitsmodell basieren. Alle merkmalbasierten Ansätze erfüllen diese Anforderung nur teilweise, da die meisten Abhängigkeitsmodelle zwar Merkmale berücksichtigen, jedoch nicht für die Analyse von Fertigungssystemen erstellt wurden. Die Ausnahme hierbei bildet der Ansatz von Siddharth und Sarkar, der Produktionssystemmerkmale am Rande betrachtet. Diese Betrachtung findet aber nicht im ausreichenden Maß zur Erfüllung der Anforderung 3 statt, da beispielsweise Abhängigkeiten innerhalb des Produktionssystems nicht berücksichtigt werden.

Bezüglich Anforderung 4 ist ersichtlich, dass der Großteil der vorgestellten Ansätze diese Anforderung nicht erfüllt. Ein Grund dafür ist, dass diese Ansätze für ECs entwickelt wurden oder aus dem Produktdesignbereich stammen und dadurch lediglich Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Produktkomponenten bzw. -merkmalen modellieren. Die Ansätze von Olmez et al. sowie von Siddharth und Sarkar, die eine Verbindung zum MC besitzen, erfüllen die Anforderung 4 teilweise, da sie Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Domänen in der Produktion berücksichtigen. Die Unterteilung der Domänen folgt allerdings nicht dem PPR-Konzept. Obwohl der Ansatz von Karl für das MC entwickelt wurde, erfüllt er die Anforderung nicht, da das Abhängigkeitsmodell ausschließlich Aspekte des Fertigungssystems umfasst.

In der Tabelle 4-2 ist weiterhin zu erkennen, dass die meisten Ansätze offene sowie maschinen-interpretierbare Datenformate, wie z.B. CSV, nutzen und dementsprechend die Anforderung 5 vollständig erfüllen. Lediglich die Ansätze von Karl und von Tang et al. erfüllen die Anforderung nur teilweise, da sie zwar maschinen-interpretierbare aber keine offenen Formate nutzen. Im vorgestellten Ansatz von Yang und Duan wird lediglich die graphische Repräsentationsform des Abhängigkeitsmodells beschrieben. Ein Datenformat wird nicht vorgestellt.

Bezüglich der letzten Anforderung ist zu erkennen, dass nur drei der vorgestellten Ansätze die Anforderung teilweise erfüllen. Hierbei erfüllt der Ansatz von Karl diese Anforderung lediglich teilweise, da die Verknüpfung zwischen Abhängigkeitsmodell und Fähigkeitsmodell nicht systematisch stattfindet. Im Ansatz muss die Verknüpfung manuell und individuell von Experten vorgenommen werden. Die Ansätze von Olmez et al. sowie von Siddharth und Sarkar sehen zwar eine Verknüpfung zum Fertigungssystem vor, jedoch wird kein explizites Fähigkeitsmodell des Fertigungssystems vorgestellt, daher erfüllen sie die Anforderung 6 nicht. Die restlichen Ansätze erfüllen die Anforderung ebenfalls nicht, da sie in keiner Weise eine Beschreibung oder ein Fähigkeitsmodell für Fertigungssysteme vorsehen.

Tabelle 4-2 Bewertung der vorgestellten Ansätze zur Generation von technischen Änderungsmöglichkeiten

		Anforderung 3	Anforderung 4	Anforderung 5	Anforderung 6
Komponentenbasiert	**Clarkson et al.**	○	○	●	○
	Tang et al.	○	○	◑	○
	Karl	◑	○	◑	◑
	Olmez et al.	◑	◑	●	○
Merkmalbasiert	**Yang und Duan**	◑	○	○	○
	Hamraz	◑	○	●	○
	Zheng et al.	◑	○	●	○
	Brahma und Wynn	◑	○	●	○
	Siddharth und Sarkar	◑	◑	●	○

○ Nicht erfüllt ◑ Teilweise erfüllt ● Vollständig erfüllt

Anhand der vorangegangenen Ausführungen ist erkennbar, dass keiner der vorgestellten Ansätze die gestellten Anforderungen dieser Arbeit an ein Abhängigkeitsmodell für die automatisierte Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten auf Merkmalebene vollständig erfüllt. Der daraus ableitbare Handlungsbedarf wird in Unterkapitel 4.4 detailliert diskutiert.

4.4 Ableitung des Handlungsbedarfs

Anhand der vorangegangenen Analysen und Bewertungen aus Unterkapitel 4.2.3 und Unterkapitel 4.3.3 wird im Folgenden der Handlungsbedarf bezüglich der Problemstellung sowie Zielsetzungen dieser Arbeit abgeleitet.

Hinsichtlich des eingegrenzten Untersuchungsbereichs wurde durch die Analyse der bestehenden Fachliteratur deutlich, dass diverse Ansätze veröffentlicht wurden, die sich mit einem ähnlichen Untersuchungsbereich befassen. Diese Ansätze könnten durch bestimmte Modifizierungen auch für den definierten Untersuchungsbereich anwendbar sein. Forschungsarbeiten und die dazugehörigen Ansätze, die sich mit dem gleichen Untersuchungsbereich befassen, existieren nur in geringer Anzahl. Das Problem der bestehenden Ansätze ist jedoch, dass keiner der Ansätze die Anforderungen hinsichtlich der beiden Teilzielsetzungen dieser Arbeit vollständig erfüllt. Bei den bestehenden Ansätzen für die Ermittlung des technischen Änderungsbedarfs ist das primäre Defizit, dass die Ansätze keine systematische Verknüpfung zu Abhängigkeitsmodellen besitzen. Des Weiteren sind die Fähigkeitsmodelle auch nicht im geforderten Maße mit produktorientierten Anforderungsbeschreibungen kompatibel. Ähnlich verhält es sich mit den diskutierten Ansätzen für die Generierung von technischen Änderungsmöglich-

keiten. Auch hier besteht ein großes Defizit bei der Verknüpfung der Abhängigkeitsmodelle mit Modellen von Fertigungssystemen für die Änderungsbedarfsermittlung. Ein Grund für dieses Defizit ist, dass die beiden Teilproblemstellungen meist in den Ansätzen separat betrachtet wurden. Der einzige Ansatz, der beide Teilprobleme gemeinsam betrachtet, wurde von Karl vorgestellt. Allerdings wurde in der Analyse deutlich, dass dieser Ansatz die gestellte Anforderung 6 bezüglich Verknüpfungsweise nicht vollständig erfüllt. Zudem wurde auch festgestellt, dass der Ansatz von Karl weitere Defizite bezüglich anderer Anforderungen aufweist. Folglich kann aus dieser Erkenntnis als Handlungsbedarf abgeleitet werden, dass Modelle und dazugehörige Methoden für die Änderungsbedarfsermittlung und für die Generierung von Änderungsmöglichkeiten entwickelt werden müssen, die systematisch miteinander verbunden und aufeinander abgestimmt sind, um die Basis für einen effizienten und durchgängigen technischen Änderungsprozess zu legen. Darüber hinaus wurde bei der Analyse der Ansätze für die Änderungsbedarfsermittlung erfasst, dass aufgrund der Fokussierung auf die technischen Prozesse der Großteil der Ansätze konzeptionelle Defizite bezüglich der Effizienz des Abgleichprozesses zwischen den Systemfähigkeiten und Anforderungen besitzt. Dementsprechend besteht auch in dieser Hinsicht ein Handlungsbedarf. Des Weiteren konnte bei der Analyse der bestehenden Ansätze zur Generierung von Änderungsmöglichkeiten herausgearbeitet werden, dass die untersuchten Ansätze durchgängig Defizite bezüglich zwei Anforderungen besitzen. Das erste durchgängige Defizit betrifft die Anforderung 3, da alle der untersuchten Abhängigkeitsmodelle die geforderte systematische Ermittlung von Änderungsmöglichkeiten für Fertigungssysteme auf Merkmalebene maximal nur teilweise ermöglichen. Das zweite durchgängige Defizit betrifft Anforderung 4, da keines der untersuchten Abhängigkeitsmodelle konsequent Interdependenzen gemäß dem PPR-Konzept beschreibt. Folglich bedarf es auch der Entwicklung eines Abhängigkeitsmodells für Fertigungssysteme, welches es erlaubt die geforderten Änderungsmöglichkeiten direkt auf Merkmalebene zu ermitteln und zudem die Abhängigkeiten gemäß dem PPR-Konzept beschreibt, um die angestrebte Nachvollziehbarkeit der Änderungsmöglichkeiten zu erhalten.

Zusammenfassend kann daher konstatiert werden, dass keiner der untersuchten Ansätze die gestellten Anforderungen zur Erreichung der in dieser Arbeit definierten Zielsetzungen in Gänze erfüllt. Entsprechend des abgeleiteten Handlungsbedarfs wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit ein Ansatz erarbeitet, der die ermittelten Defizite des Stands der Forschung überwindet und die beschriebenen Anforderungen zur Erreichung der Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit vollständig erfüllt.

5 Überblick über den Ansatz und Vorstellung des laufenden Beispiels

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über den groben Aufbau des erforschten Ansatzes gegeben. Hierbei werden die verschiedenen Bestandteile des Ansatzes beschrieben sowie deren Zusammenhänge skizziert. Anschließend wird in diesem Kapitel das laufende Beispiel vorgestellt, anhand dessen in den nachfolgenden Kapiteln die beschriebenen Inhalte veranschaulicht werden.

5.1 Allgemeiner Aufbau des Ansatzes

Der erforschte Ansatz besteht im Kern aus einem Fähigkeitsmodell, einem Abhängigkeitsmodell sowie einer Methode zur Änderungsbedarfsermittlung und einer Methode für die Generierung von Änderungsmöglichkeiten. Abbildung 5-1 illustriert den schematischen Aufbau des erforschten Ansatzes.

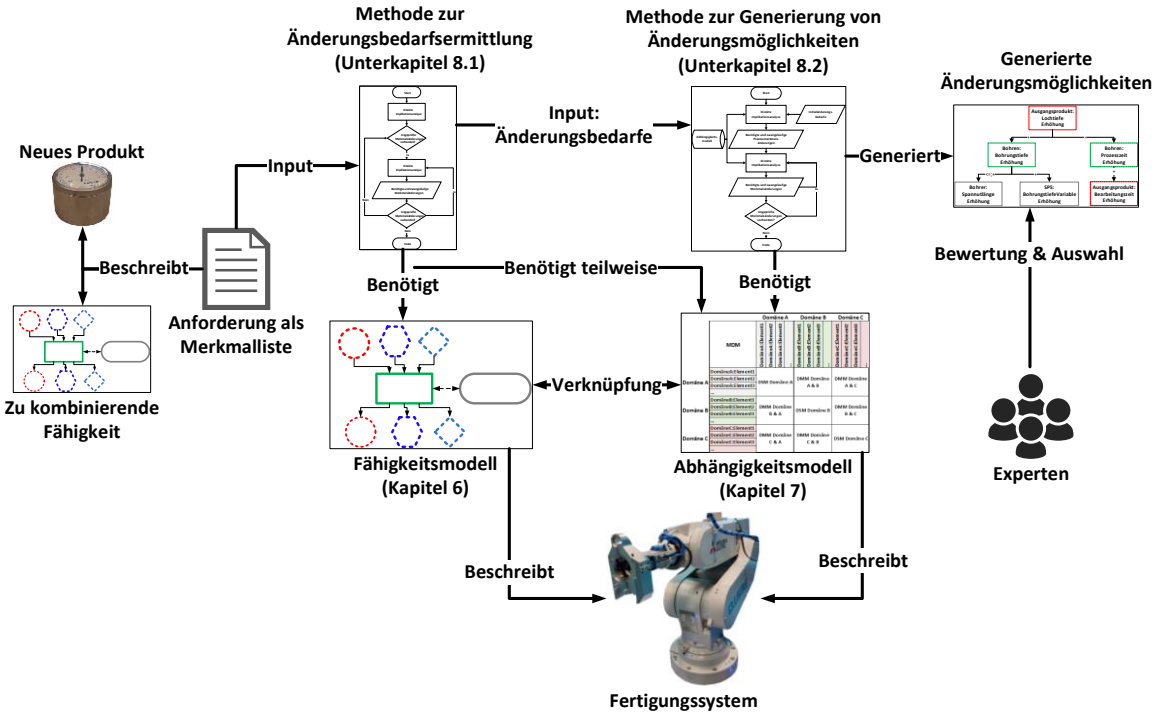

Abbildung 5-1 Überblick des erforschten Ansatzes

In Abbildung 5-1 ist zu erkennen, dass das Fähigkeitsmodell sowie das Abhängigkeitsmodell das zu untersuchende Fertigungssystem beschreiben. Das Fähigkeitsmodell beinhaltet hierbei relevante Aspekte hinsichtlich der möglichen zu verarbeitenden und auszubringenden Objekte eines Fertigungssystems. Das Abhängigkeitsmodell hingegen bildet die bestehenden Zusammenhänge zwischen den Systemelementen ab. Zudem sind beide Modelle miteinander verknüpft, da das Abhängigkeitsmodell die Zusammenhänge zwischen den Objekten aus dem Fähigkeitsmodell beschreibt. Des Weiteren ist der Abbildung zu entnehmen, dass das Fähigkeitsmodell und Teile des Abhängigkeitsmodells von der Methode zur Änderungsbedarfsermittlung benötigt werden. Anhand der Modelle und einer Anforderungsbeschreibung prüft die Methode, ob das abgebildete Fertigungssystem in seiner aktuellen Form die Anforderungen erfüllen kann oder ob es dafür technischer Änderungen bedarf. Die ermittelten Änderungsbedarfe bilden den Input für die Methode zur Generierung von Änderungsmöglichkeiten. Die Anforderungsbeschreibung wird hierbei in Form einer strukturierten Liste abgebildet, die Merk-

male von geforderten Eingangs- und Ausgangsobjekten und deren Ausprägungen beinhaltet. Im erforschten Ansatz kann eine Anforderungsbeschreibung entweder ein zu fertigendes Produkt oder eine zu kombinierende Fähigkeit, die beispielsweise aufgrund einer Rekonfiguration auftritt, darstellen.

Die Methode zur Generierung von Änderungsmöglichkeiten benötigt zusätzlich zu den ermittelten Änderungsbedarfen das Abhängigkeitsmodell. Anhand dessen können Änderungsmöglichkeiten für die ermittelten Änderungsbedarfe erzeugt werden, einschließlich einer Änderungsauswirkungsanalyse. Die generierten Änderungsmöglichkeiten werden hierbei als Baumgraphen abgebildet und dienen Experten als Grundlage für die Bewertung sowie Auswahl einer geeigneten technischen Änderung.

5.2 Vorstellung des laufenden Beispiels

Das laufende Beispiel ist Teil eines modularen Produktionssystems mit der Bezeichnung *MPS500* von *Festo Didactic*. Das Produktionssystem fertigt sogenannte *Kurzhubzylinder* und besteht aus einem Wareneingangsmodul, Bearbeitungsmodul, Visionsmodul, Hochregallagermodul, Warenausgangsmodul, einer Roboterzelle sowie einem rundlaufenden Förderband als Transportsystem. Abbildung 5-2 zeigt ein 3D-Modell der *MPS500*.

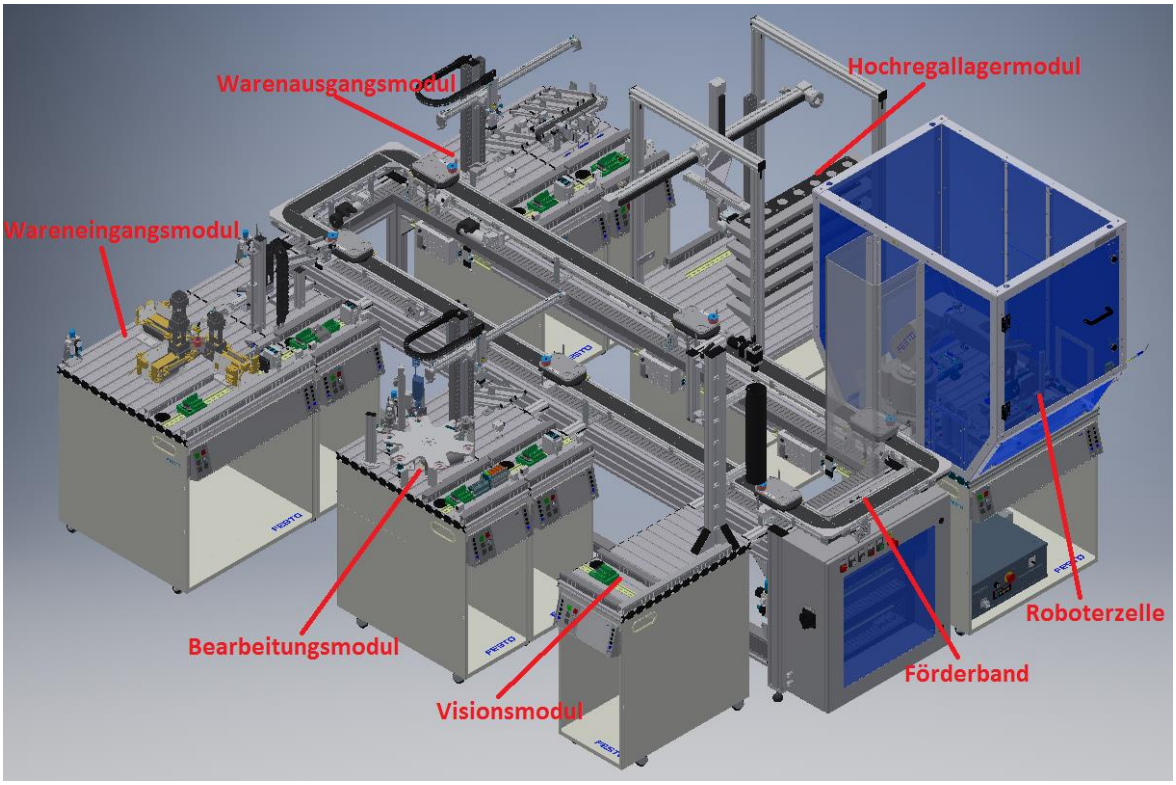

Abbildung 5-2 Überblick MPS500

Ausgewählte Bestandteile des Bearbeitungsmoduls der *MPS500* sollen im Rahmen dieser Arbeit als laufendes Beispiel dienen. Das Bearbeitungsmodul besteht aus einem Handhabungsmodul und einem Bohrmodul. Beide Module besitzen jeweils eine eigene Steuerung. Der Prozessablauf des Bearbeitungsmoduls ist wie folgt: Das Handhabungsmodul nimmt ein Werkstück mit einem Greifer vom Förderband auf und transportiert es zum Bohrmodul. Dort wird das Werkstück mittels eines Rundschalttisches zu einer Bohrstation befördert, wo das Werkstück anschließend gebohrt wird. Das Werkstück bleibt beim Bohrvorgang auf dem Rundschalttisch liegen. Der Rundschalttisch wird durch einen Schritt-

motor angetrieben und besteht aus einer Unter- und Oberplatte, wobei die Oberplatte sechs Aussparungen besitzt. Durch die Aussparrungen soll sichergestellt werden, dass das Werkstück auf dem Rundschalttisch beim Transportvorgang verbleibt. Die Bohrstation besitzt hierbei eine fixe Bohrerlänge sowie einen Linearantrieb, der den Bohrer in vertikaler Richtung bewegen kann. Im Anschluss wird das Werkstück zu einer Bohrlochprüfstation befördert, wo geprüft wird, ob die Bohrungsmaße den Vorgaben entsprechen. Nach der Prüfung wird das gebohrte Werkstück vom Rundschaltisch zur Ausgangsposition transportiert. Von dort aus nimmt der Greifer des Handhabungsmoduls das gebohrte Werkstück wieder auf und transportiert es bei korrekter Bohrung zurück zum Förderband. Bei einer nicht korrekten Bohrung wird das Werkstück zu einer Luftkissenrutsche transportiert, wo mangelhaft gefertigte Werkstücke gelagert werden. Die Luftkissenrutsche besteht aus einer mechanischen Rutsche sowie Druckluftdüsen, mit denen ein Luftkissen erzeugt werden kann, um die Reibung zwischen Werkstück und mechanischer Rutsche zu reduzieren. Abbildung 5-3 zeigt ein 3D-Modell des beschriebenen Bearbeitungsmoduls. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden Bestandteile des Bohrmoduls an verschiedenen Stellen genutzt, um die Inhalte zu veranschaulichen.

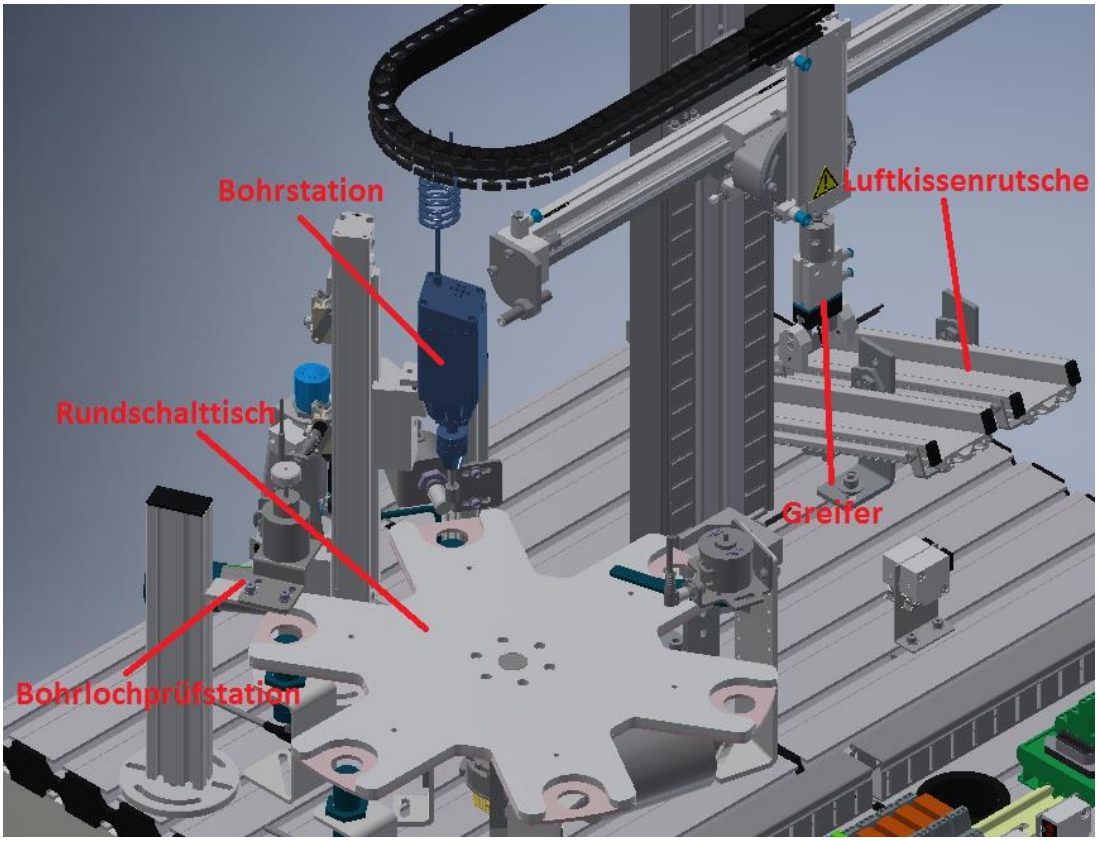

Abbildung 5-3 Bearbeitungsmodul der MPS500

6 Fähigkeitsmodellierung für die Ermittlung des Änderungsbedarfs

In diesem Kapitel wird die Fähigkeitsmodellierung von automatisierten Fertigungssystemen vorgestellt. Das Fähigkeitsmodell soll dazu dienen, den technischen Änderungsbedarf an Fertigungssystemen automatisiert zu ermitteln. Hierfür wird in Unterkapitel 6.1 zunächst das Modellierungskonzept für Fähigkeiten im Zusammenhang mit automatisierten Fertigungssystemen präsentiert. Im anschließenden Unterkapitel 6.2 werden verschiedene Beschreibungsmittel aus der Fachliteratur vorgestellt, die sich zur Darstellung des Fähigkeitsmodellierungskonzepts eignen. Im Unterkapitel 6.3 werden verschiedene Bewertungskriterien vorgestellt. Darauffolgend wird auf Basis derer ein geeignetes Beschreibungsmittel für die Darstellung der Fähigkeitsmodellierung ausgewählt. Die Darstellung der Fähigkeitsmodellierung anhand des ausgewählten Beschreibungsmittels wird abschließend in Unterkapitel 6.4 erläutert.

6.1 Modellierungskonzept der Fähigkeiten von automatisierten Fertigungssystemen

Im Folgenden wird zunächst die grundlegende Fähigkeitsmodellierung beschrieben. Hierbei wird erläutert, anhand welcher Systemobjekte die Fertigungsfähigkeiten beschrieben werden und wie die dazugehörigen Merkmale und Merkmalausprägungen bestimmt werden. Anschließend wird dargelegt, wie mittels des Modellierungskonzepts die Komposition sowie Dekomposition von Fähigkeiten beschrieben werden.

6.1.1 Grundlegendes Modellierungskonzept für Fähigkeiten von Fertigungssystemen

Das entwickelte Fähigkeitsmodellierungskonzept für automatisierte Fertigungssysteme basiert auf dem beschriebenen Verständnis der Objekte und des Aufbaus eines Fertigungssystems nach [VDI/VDE 3682]. Aufgrund der in Unterkapitel 3.1 erläuterten Aspekte stellt dieses Systemverständnis von Fertigungsmaschinen und -baugruppen eine geeignete Basis für die angestrebte Fähigkeitsmodellierung dar. Das grundlegende Prinzip des entwickelten Modellierungskonzepts ist es, die Fähigkeiten eines Fertigungssystems mittels der Eingangs- und Ausgangsobjekte der technischen Prozesse des Systems zu beschreiben. Aufgrund der in Unterkapitel 3.2.2 beschriebenen Zusammenhänge können die Merkmale der technischen Ressource gleichermaßen als Merkmale von ausführbaren Prozessen dargestellt werden. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der Wirkprinzipien Prozessmerkmale teilweise hinzukommen können, die lediglich indirekt in Zusammenhang mit der technischen Ressource stehen und von anderen Prozessmerkmalen oder Ausgangs- und Eingangsproduktmerkmalen abhängen. Ein Beispiel für solch ein Merkmal ist die Gewichtskraft im Beispiel der Luftkissenrutsche (siehe Unterkapitel 3.2.2). Der Großteil der Ansätze aus dem Stand der Forschung bleibt auf dieser Abstraktionsebene und nutzt die Prozessmerkmale, um die Fähigkeiten des Fertigungssystems zu beschreiben. Diese Merkmale des Prozesses können jedoch aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge in Unterkapitel 3.2.1 wiederum als Merkmale von Produkten, Informationen und Energien dargestellt werden, die dann ebenfalls die Fähigkeiten des Fertigungssystems repräsentieren. Bedingt durch den Umwandlungsaspekt des Prozesses müssen die Produkte, Informationen und Energien jedoch in Eingangs- und Ausgangsobjekten unterschieden werden. Das beschriebene Grundprinzip der Fähigkeitsmodellierung ist in Abbildung 6-1 dargestellt.

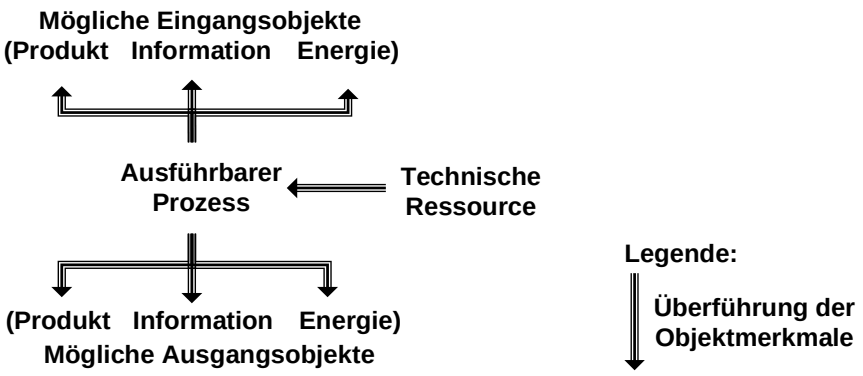

Abbildung 6-1 Grundprinzip der Fähigkeitsmodellierung

Die Merkmale der Eingangsobjekte beschreiben hierbei nicht zwingend ein konkretes Produkt-, Information- oder Energieobjekt, sondern eine Menge an möglichen Objekten, die dem Prozess zugeführt werden können bzw. müssen, um den Prozess durchzuführen. Ähnliches gilt für die Merkmale der Ausgangsobjekte, die eine Menge an Produkten, Informationen und Energien repräsentieren, die von der technischen Ressource mittels des Prozesses generiert werden können. Dementsprechend stellen die Merkmale der Ausgangsobjekte einen Lösungsraum dar. Dieser Lösungsraum kann als Zusicherung der technischen Ressource bezüglich der produzierbaren Objekte interpretiert werden. Die Merkmale der Eingangsobjekte hingegen können primär als Anforderungen aufgefasst werden, die von der technischen Ressource gestellt werden, um den dazugehörigen technischen Prozess ausführen zu können. Wie bereits einleitend erwähnt, werden ausschließlich diese Beschreibungen der Eingangs- und Ausgangsobjekte genutzt, um die Fähigkeiten eines Fertigungssystems zu modellieren. Infolgedessen wird bei einer Fähigkeitsabfrage oder -analyse in diesem Modellierungskonzept untersucht, welche Eingangs- und welche Ausgangsobjekte ein System verarbeiten bzw. generieren kann. Die dazugehörigen Prozess- und Ressourcenmerkmale sind für die Fähigkeitsabfrage oder Fähigkeitsanalyse nicht relevant. Hierbei ist anzumerken, dass Abhängigkeiten zwischen den Eingangs- und Ausgangsobjekten ebenfalls berücksichtigt werden (siehe Kapitel 7).

Das beschriebene Modellierungskonzept soll anhand der beschriebenen Bohrstation aus Unterkapitel 5.2 beispielhaft erläutert werden. In Abbildung 6-2 wird beispielhaft die Überführung der Merkmale von der Bohrstation (technische Ressource) in die Merkmale eines Eingangs- und Ausgangsprodukts dargestellt. Die Farben der Rechtecke in der Abbildung sind hierbei an die Darstellung der formalisierten Prozessbeschreibung angelehnt. Die Bohrstation wird hierbei durch die Merkmale *Spannutlänge*, *Bohrerdurchmesser*, *Drehzahl des Spindelantriebs* und die *Geschwindigkeit der vertikalen Bewegung der Bohrmaschine* beschrieben. Diese Ressourcenmerkmale können in die Prozessmerkmale *Bohrungstiefe*, *Bohrungsdurchmesser*, *Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit* überführt werden, da diese Prozessmerkmale physikalische Abhängigkeiten zu den Ressourcenmerkmalen besitzen. Hierbei ist anzumerken, dass der Vereinfachung halber im Beispiel die *Vorschubgeschwindigkeit* mit der *Geschwindigkeit der vertikalen Bewegung der Bohrmaschine* gleichgesetzt wird. Aus dem gleichen Grund wird bei der *Bohrungstiefe* nur die *Spannutlänge* als bestimmendes Ressourcenmerkmal betrachtet, da Ressourcenmerkmale, wie z.B. *vertikaler Verfahrweg der Bohrstation*, die einen Einfluss auf die *Bohrungstiefe* haben, nicht im Beispiel aufgeführt sind. Des Weiteren ist anzumerken, dass das Prozessmerkmal *Prozesszeit* aufgeführt wird als Beispiel für ein Merkmal, das nicht direkt von den Ressourcenmerkmalen ableitbar ist, sondern ausschließlich die Eigenschaft des Prozesses beschreibt. Anhand der aufgeführten Prozessmerkmale wird ein mögliches Ausgangsprodukt beschrieben, das durch

die Merkmale *Lochtiefe*, *Lochdurchmesser* und *Bearbeitungszeit* spezifiziert werden kann. Dieses mögliche Ausgangsprodukt ist auf die bestehenden Abhängigkeiten seiner Produktmerkmale zu den aufgeführten Prozessmerkmalen zurückzuführen. Analog dazu kann ein mögliches Eingangsprodukt beschrieben werden, das durch die *Zugfestigkeit* spezifiziert wird. Dementsprechend wird in diesem Beispiel die Fähigkeit der Bohrstation durch diese beiden Produktbeschreibungen modelliert. Verbal ausgedrückt bedeutet dies, dass die Bohrstation die Fähigkeit besitzt Produkte zu verarbeiten, die eine gewisse Zugfestigkeit besitzen (andere Merkmale des Produkts sind in diesem Beispiel nicht relevant), und ein Produkt daraus zu fertigen, das ein Loch mit einer gewissen Tiefe sowie Durchmesser besitzt und dafür eine gewisse Bearbeitungszeit benötigt.

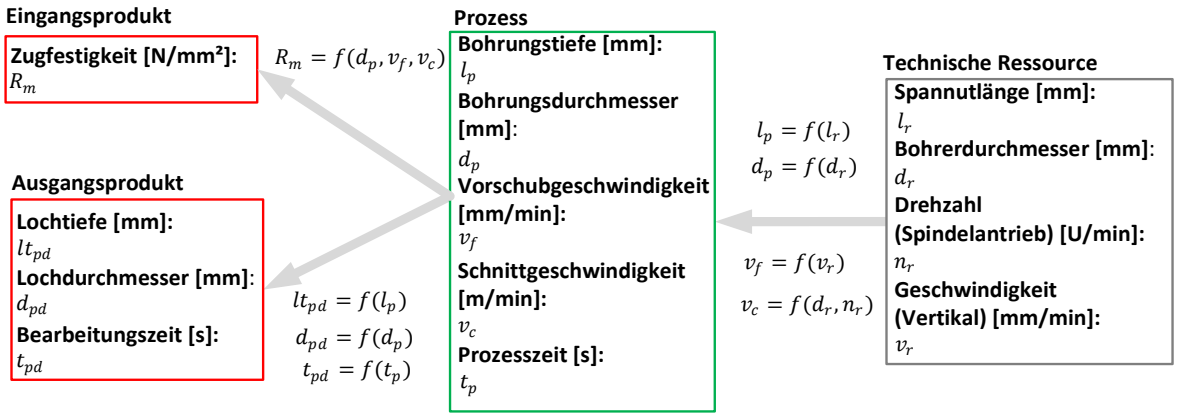

Abbildung 6-2 Beispielhafte Überführung der Objektmerkmale der Bohrstation

Für die Bestimmung der Ausprägungen der Merkmale (im weiteren Verlauf ebenfalls als Merkmalwerte bezeichnet) werden die Abhängigkeiten zwischen den Ressourcenobjekten und dem Prozess sowie zwischen dem Prozess und den Eingangs- bzw. Ausgangsobjekten genutzt, um die Überführung der Ressourcenausprägungen in die Objektausprägungen der Eingangs- und Ausgangsobjekte durchzuführen. Die Abhängigkeiten können hierbei formal als mathematische Gleichungen oder semi-formal z.B. in tabellarischer Form vorliegen. Für das Beispiel der Bohrstation wurde die Überführung der Merkmalwerte in Abbildung 6-3 mit Beispielwerten dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die meisten Abhängigkeiten zwischen den Objektmerkmalen relativ trivial sind und durch einfache mathematische Gleichungen beschrieben werden können. Hinsichtlich der *Bohrungstiefe* und der *Spannutlänge* wird die Abhängigkeit mittels einer Ungleichung beschrieben, da beim Bohren nicht immer die volle *Spannutlänge* verwendet werden muss, wodurch die *Bohrungstiefe* einen Wert zwischen 0 Millimeter und der gesamten Spannutlänge (20 Millimeter) annehmen kann. Für die Bestimmung des Wertes der *Zugfestigkeit* des Eingangsprodukts kann hierbei auf Tabellen zurückgegriffen werden, die die Abhängigkeiten zwischen dem *Bohrungsdurchmesser*, der *Vorschubgeschwindigkeit*, der *Schnittgeschwindigkeit* und der *Zugfestigkeit* eines Produktes quantitativ beschreiben. Anhand dieser Tabellen konnte ermittelt werden, dass die *Zugfestigkeit* des Eingangsprodukts kleiner gleich 500 Newton pro Quadratmillimeter betragen muss [ABD+18]. In der Abbildung ist weiterhin zu erkennen, dass die *Bearbeitungszeit* des Ausgangsprodukts gleich der *Prozesszeit* ist. Die *Prozesszeit* wiederum wird bestimmt durch die *Lochtiefe* dividiert durch die *Vorschubgeschwindigkeit*. Die kürzeste *Prozesszeit* und demzufolge auch *Bearbeitungszeit* geht dabei gegen 0 Sekunden, wenn die Lochtiefe gegen 0 Millimeter geht. Die maximale *Prozesszeit* hingegen beträgt in dem Beispiel 3 Sekunden, wenn die *Lochtiefe* 20 Millimeter und die *Vorschubgeschwindigkeit* 390 Millimeter pro Minute beträgt.

Am Beispiel ist zu erkennen, dass einerseits Merkmale existieren, deren Ausprägungen anhand von festen Intervallen beschrieben werden können, und andererseits Merkmale bestehen, deren Ausprägungen von Merkmalen der Eingangs- oder Ausgangsobjekte abhängig sind. Die beschriebene *Prozesszeit* ist ein Beispiel für letztgenannte Merkmale, da die Ausprägung der *Prozesszeit* von den Ausprägungen des Produktmerkmals *Lochtiefe* und des Prozessmerkmals *Vorschubgeschwindigkeit* abhängt. Aufgrund dieser Abhängigkeiten können Änderungen der Merkmalausprägungen auftreten, wenn eine konkrete Anforderung, in Form von geforderten Eingangs- oder Ausgangsobjektmerkmalen, an die Fähigkeit des Systems gestellt wird. Wenn im aufgeführten Beispiel in einem Auftrag ein Produkt gefordert wird, das eine *Lochtiefe* von 8 Millimeter besitzt, würde sich die Ausprägung der Prozesszeit von $0\ s < t_p \leq 3\ s$ auf $0{,}85\ s < t_p \leq 1{,}2\ s$ ändern. Demzufolge ist es bei solchen Merkmalen nicht ausreichend ein festes Intervall als Ausprägung zu beschreiben, da die Merkmalausprägung sich dynamisch in Abhängigkeit der Anforderung verändern kann. Um diese dynamischen Änderungen von Merkmalausprägungen bei konkreten Anforderungen bestimmen zu können, müssen die Abhängigkeiten, die für die Bestimmung der Ausprägungen relevant sind, in einem Modell beschrieben sein. In der vorliegenden Arbeit geschieht dies anhand des Abhängigkeitsmodells, das in Kapitel 7 vorgestellt wird.

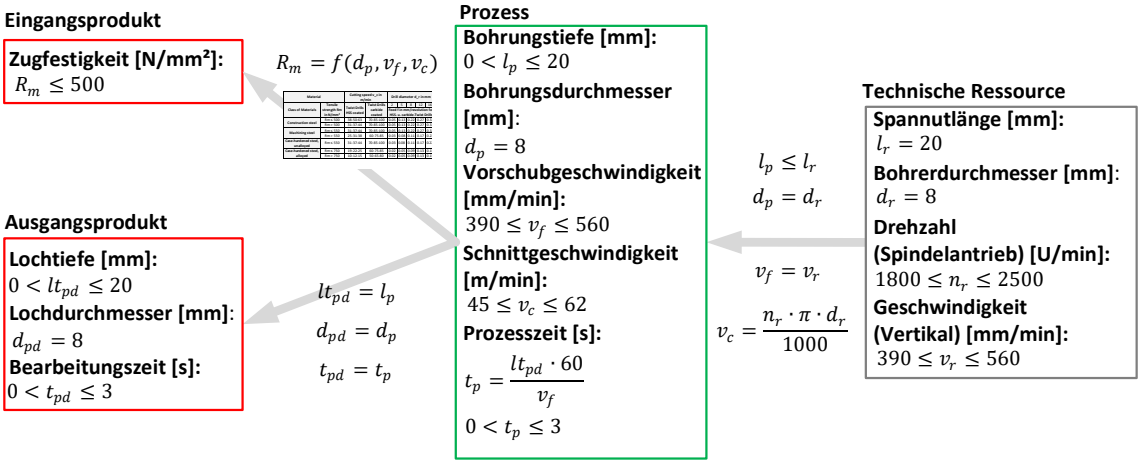

Abbildung 6-3 Überführung der Objektmerkmalsausprägungen der Bohrstation

Analog zu der beschriebenen Überführung der Ressourcenmerkmale in Merkmale der Eingangs- und Ausgangsprodukte können im Beispiel noch weitere Merkmale von Eingangs- und Ausgangsobjekten (Informationen und Energien) zur Modellierung der Fähigkeiten des Systems beschrieben werden. Abbildung 6-4 illustriert exemplarisch die Fähigkeitsbeschreibung der Bohrstation erweitert mit Eingangsinformationen, -energien und Ausgangsinformation, angelehnt an der Darstellung der formalisierten Prozessbeschreibung. In der Abbildung ist beispielsweise zu erkennen, dass die Bohrstation neben dem Eingangsprodukt ebenfalls ein binäres Signal als *Eingangsinformation* sowie *Eingangsenergie* mit einer *Spannung* zwischen 220 Volt und 240 Volt benötigt, um den Bohrprozess technisch ausführen zu können. Des Weiteren ist die Bohrstation fähig neben dem *Ausgangsprodukt* ein binäres Signal als *Ausgangsinformation* zu generieren. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Eingangs- und Ausgangsobjekte in diesem Beispiel noch weiter ausspezifiziert werden könnten, um ein detaillierteres Fähigkeitsmodell zu erhalten. Beispielsweise besitzen die Ausgangsobjekte ebenfalls die Merkmale der Eingangsobjekte und deren Ausprägungen, wenn diese beiden Objekte physisch dasselbe Objekt sind und die Merkmale nicht durch den Prozess geändert werden. Dementsprechend könnte beim *Ausgangsprodukt* auch die *Zugfestigkeit* angegeben werden, da das *Eingangs-* und *Ausgangsprodukt* physisch dasselbe Produkt sind und der Bohrprozess die *Zugfestigkeit* des Produktes nicht verändert. Des

Weiteren hätte ebenfalls die thermische Energie im Fähigkeitsmodell, die bei der Ausführung des Bohrprozesses auftritt, beschrieben werden können. Aufgrund der Anschaulichkeit beschränkte sich das Beispiel jedoch auf nur wenige Objekte mit exemplarischen Merkmalen.

Abschließend ist noch anzumerken, dass für die Erstellung der Fähigkeitsbeschreibung in der Praxis nicht zwangsläufig alle Abhängigkeiten zwischen der Ressource, dem Prozess und den Eingangs- bzw. Ausgangsobjekten explizit bekannt sein müssen. Die Fähigkeitsbeschreibung könnte ebenfalls anhand von Erfahrungswerten, empirischen Daten oder Ähnlichem ermittelt werden. Beispielsweise könnte ein Maschinenführer aufgrund seiner Erfahrung bereits die Merkmale der möglichen Eingangs- und Ausgangsprodukte und deren Ausprägungen beschreiben, ohne die genauen Abhängigkeiten zum Prozess zu kennen. Hinsichtlich der Änderungsbedarfsermittlung müssen jedoch Abhängigkeiten zwischen gewissen Merkmalen bekannt und modelliert sein, da sich Merkmalausprägungen auf Basis einer Anfrage dynamisch verändern können, wie anhand des Merkmals *Bearbeitungszeit* erläutert. Dementsprechend kann es in solchen Fällen vorkommen, dass für die Änderungsbedarfsermittlung das vorgestellte Fähigkeitsmodell allein nicht ausreicht und Teile des Abhängigkeitsmodells benötigt werden.

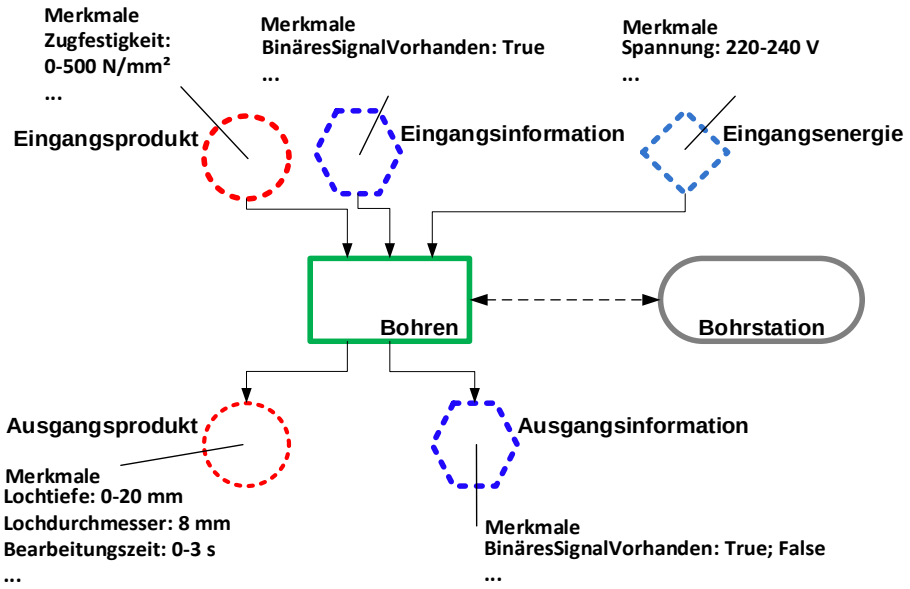

Abbildung 6-4 Schematische Darstellung des Fähigkeitsmodells der Bohrstation mit beispielhaften Merkmalen in Anlehnung an die Formalisierte Prozessbeschreibung

6.1.2 Komposition und Dekomposition von Fähigkeiten

Aus der Analyse des Stands der Forschung geht hervor, dass die Fähigkeiten eines Fertigungssystems sich aus Teilfähigkeiten zusammensetzen können bzw. mit weiteren Fähigkeiten von anderen Fertigungssystemen kombinierbar sind, um komplexere Fähigkeiten zu realisieren. Im entwickelten Fähigkeitsmodellierungskonzept werden diese Aspekte auf Basis des Kompositions-/Dekompositionsansatzes der formalisierten Prozessbeschreibung beschrieben. Dementsprechend können die Fähigkeitsbeschreibungen eines Fertigungssystems anhand der Beschreibung ihrer Teilfähigkeiten weiter detailliert werden. Ebenso kann die Fähigkeitsbeschreibung mit anderen Fähigkeitsbeschreibungen kombiniert werden, um die Fähigkeitsbeschreibung einer komponierten Fähigkeit zu modellieren. Hierbei entspricht die komponierte Fähigkeit nicht zwangsläufig der Summe ihrer Teilfähigkeiten. Die Gründe hierfür können in dem sequentiellen oder parallelen Ablauf der Teilfähigkeiten liegen oder aus Abhängigkeiten resultieren, die durch die Komposition der technischen Prozesse und technischen Ressourcen

der Teilfähigkeiten entstehen. Im Folgenden wird zunächst erläutert, wie bei der Komposition von einzelnen Fähigkeiten eine komponierte Fähigkeit entsteht und wie diese sich von der Summe ihrer Teilfähigkeiten unterscheidet. Hierfür werden zunächst die Besonderheiten bei der Komposition/Dekomposition in Zusammenhang mit sequentiellen Abläufen von Teilfähigkeiten erläutert und anschließend die Besonderheiten in Zusammenhang mit parallelen Abläufen von Teilfähigkeiten erörtert. Hierbei ist anzumerken, dass eine komponierte Fähigkeit ebenfalls alternative Abläufe von Teilfähigkeiten besitzen kann. In der vorliegenden Arbeit werden alternative Abläufe als mehrere sequentielle Abläufe beschrieben, die jeweils einen alternativen Ablauf repräsentieren. Darauffolgend werden die Abhängigkeiten erläutert, die bei einer Komposition auftreten können und dazu führen, dass die zusammengesetzte Fähigkeit sich von der Summe ihrer Teilfähigkeiten unterscheidet. Am Ende dieses Unterkapitels werden abschließend zwei Modellierungsmöglichkeiten für komponierte Fähigkeiten präsentiert.

Besonderheiten bei der Komposition/Dekomposition in Zusammenhang mit sequentiellen Abläufen

Bei sequentiellen Abläufen von Teilfähigkeiten kann es zu einer Überschneidung von Ausgangsobjekten der vorgelagerten Fähigkeit mit Eingangsobjekten der nachgelagerten Fähigkeit kommen. Dies ist der Fall, wenn das Ausgangsobjekt der vorgelagerten Fähigkeit von der nachgelagerten Fähigkeit verarbeitet werden soll. Dementsprechend repräsentiert das Ausgangsobjekt in diesen Fällen ebenfalls das Eingangsobjekt der nachgelagerten Fähigkeiten. Hierbei müssen die Beschreibungen dieser beiden Objekte aus den einzelnen Fähigkeitsbeschreibungen zu einer Beschreibung zusammengeführt werden, da durch den sequentiellen Ablauf die beiden Objekte physisch dasselbe sind. Die zusammengeführte Beschreibung beinhaltet alle Merkmale und Ausprägungen der einzelnen Objektbeschreibungen. Wenn hierbei ein Merkmal in beiden Objektbeschreibungen der einzelnen Fähigkeitsbeschreibungen vorhanden ist, wird das Merkmal lediglich einfach in der zusammengeführten Objektbeschreibung aufgeführt. Die Ausprägung des Merkmals beträgt dabei die Schnittmenge der Merkmalausprägungen der einzelnen Objektbeschreibungen, da die Schnittmenge ein Objekt beschreibt, das beiden Fähigkeiten zusammen sequentiell bearbeiten können. Diese Besonderheit bei sequentiellen Abläufen von Teilfähigkeiten wird anhand des Bohrmodulbeispiels veranschaulicht.

Eine beispielhafte Dekomposition für die Fähigkeitsbeschreibung des Bohrmoduls aus Unterkapitel 5.2 ist in Abbildung 6-6 dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Fähigkeit des Bohrmoduls aus den beiden Teilfähigkeiten *Transport* und *Bohren* zusammengesetzt ist. Die erste Teilfähigkeit wird dabei vom Rundschalttisch bereitgestellt und die zweite Teilfähigkeit von der Bohrstation. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die beiden Teilfähigkeiten des Bohrmoduls sequentiell ablaufen. Die jeweiligen schematischen Darstellungen der einzelnen Fähigkeiten der Bohrstation und des Rundschalttisches sind in Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 abgebildet, wobei die Fähigkeitsbeschreibung der Bohrstation bereits in Unterkapitel 6.1.1 im Detail erläutert wurde. In Abbildung 6-5 ist zu erkennen, dass der Rundschalttisch ein Produkt verarbeiten kann, das eine Breite zwischen 20 bis 50 Millimeter und einem Gewicht von 0 bis 5 Kilogramm besitzt sowie sich bezüglich der x-Position im Koordinatenursprung des Rundschalttisches befindet. Die y-Position wurde aus Vereinfachungsgründen hierbei nicht berücksichtigt. Das Ausgangsprodukt (*TransportiertesProdukt*) der Transportfähigkeit besitzt eine veränderte Ausprägung hinsichtlich der x-Position und eine Prozesszeit von 2 Sekunden für den Transport. Innerhalb der komponierten Fähigkeit des Bohrmoduls findet zunächst der Transport eines Produktes (*Eingangsmaterial*) zur Bohrstation statt, wo das transportierte Produkt (*Zwischenprodukt*) anschließend verarbeitet wird. In diesem Beispiel gibt es eine Überschneidung des Ausgangsprodukts der Transportfähigkeit und des eingehenden Produkts der nachgelagerten Fähigkeit *Bohren*.

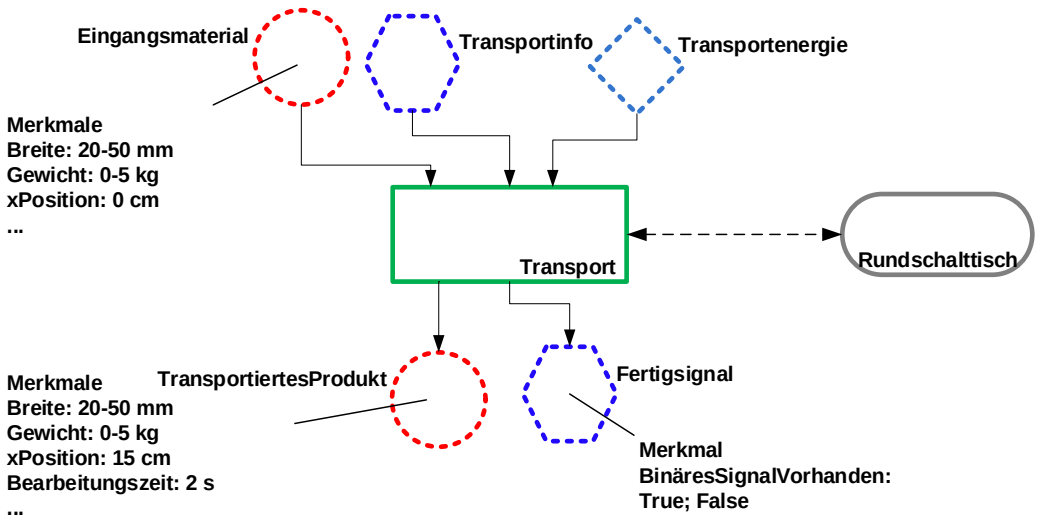

Abbildung 6-5 Schematische und beispielhafte Darstellung des Fähigkeitsmodells des Rundschalttisches

Dies führt dazu, dass das *Zwischenprodukt* in Abbildung 6-6 eine Zusammenführung des ausgegebenen Produkts (*TransportiertesProdukt*) der Transportfähigkeit und des Eingangsprodukts der Bohrstation ist und dementsprechend die Merkmale und Ausprägungen beider Produkte beinhaltet. Diese Zusammenführung ist notwendig, da das ausgehende Produkt der Transportfähigkeit und das zu bohrende Produkt im Ablauf dasselbe Produkt darstellen. Gleiches gilt für die *Startinformation* in Abbildung 6-6, die sich aus den Informationsobjekten *Fertigsignal* vom Rundschalttisch und der *Eingangsinformation* von der Bohrstation zusammensetzt. Da beide Informationsobjekte das Merkmal *BinäresSignalVorhanden* besitzen, wird auch das zusammengeführte Objekt *Startinformation* mit diesem Merkmal beschrieben und besitzt dabei die Ausprägung *True*, da dies die Schnittmenge zwischen den beiden Merkmalausprägungen der zusammenzuführenden Informationsobjekte darstellt.

Bei der Zusammenführung von Objekten bei der sequentiellen Ausführung von Fähigkeiten muss zudem geprüft werden, ob die Zusammenführung ebenfalls Auswirkungen auf die Merkmale der Eingangsobjekte der vorgelagerten Fähigkeit oder der Ausgangsobjekte der nachgelagerten Fähigkeit haben, aufgrund von bestehenden Abhängigkeiten zwischen den Systemobjekten. Beispielsweise angenommen, dass die im Beispiel beschriebene Zusammenführung von den Produkten *TransportiertesProdukt* und *Eingangsprodukt* dazu führen würde, dass das *Zwischenprodukt* lediglich eine Breite zwischen 20 und 30 Millimeter besitzt. Aufgrund von Abhängigkeiten zwischen den Objektmerkmalen der Transportfähigkeit muss die Breite des Ausgangsprodukts der Breite des Eingangsprodukts entsprechen. Dementsprechend würde die Zusammenführung dazu führen, dass innerhalb der komponierten Fähigkeit das Eingangsprodukt der Transportfähigkeit ebenfalls nur eine Breite zwischen 20 und 30 Millimeter besitzt, anstatt der eigentlichen Breite zwischen 20 und 50 Millimeter. Folglich ist es für die Bestimmung solcher Auswirkungen notwendig die Abhängigkeiten innerhalb einer Fähigkeit zu kennen. Die Abhängigkeiten sowie deren Modellierung werden detaillierter in Kapitel 7 erläutert.

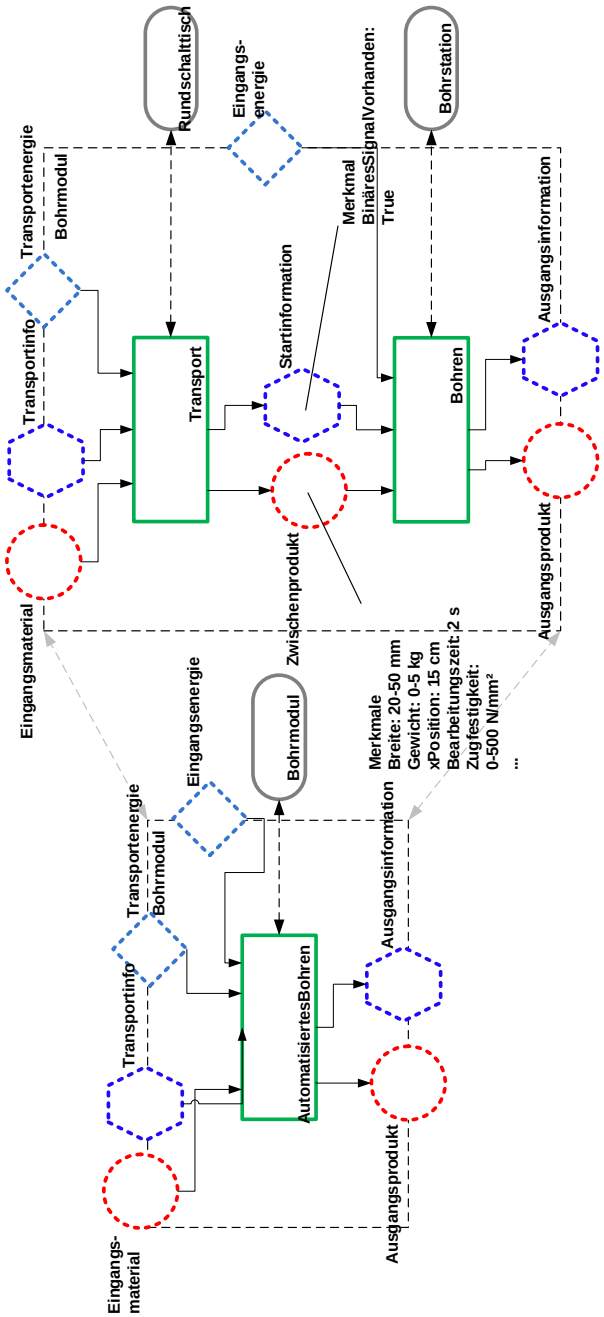

Abbildung 6-6 Schematische Darstellung der Dekomposition der Fähigkeiten des Bohrmoduls in Anlehnung an die Formalisierte Prozessbeschreibung mit beispielhaften Merkmalen

Besonderheiten bei der Komposition/Dekomposition in Zusammenhang mit parallelen Abläufen

Die beschriebene Zusammenführung von Objekten bei sequentiellen Ausführungen von Teilfähigkeiten tritt ebenfalls bei der parallelen Ausführung von Teilfähigkeiten auf. Anders als bei sequentiellen Abläufen, wo die Objektzusammenführung die Ausgangsobjekte der vorgelagerten Fähigkeit und die Eingangsobjekte der nachgelagerten Fähigkeit betreffen, können bei parallelen Abläufen die jeweiligen Eingangsobjekte oder die jeweiligen Ausgangsobjekte der beiden Fähigkeiten zusammengeführt werden. Die Zusammenführung von Eingangsobjekten tritt beispielsweise auf, wenn mehrere Fähigkeiten parallel dasselbe Eingangsprodukt verarbeiten müssen. Dementsprechend müssen die Beschreibungen der Eingangsprodukte der jeweiligen Fähigkeit zusammengeführt werden, um das Eingangsprodukt, welches aus der parallelen Verarbeitung resultiert, zu beschreiben und auch die komponierte

Fähigkeit zu modellieren. Die Zusammenführung von Ausgangsobjekten ist hingegen notwendig, wenn die Fertigung eines Ausgangsprodukts mehrere parallel ablaufende Fähigkeiten benötigt, um das aus der parallelen Verarbeitung resultierende Ausgangsprodukt zu modellieren und ebenfalls die komponierte Fähigkeit zu beschreiben. Anhand der Ausführungen ist ersichtlich, dass die Zusammenführung der Eingangsobjekte sowie die Zusammenführung der Ausgangsobjekte bei parallelen Abläufen auch gemeinsam auftreten können. Ähnlich wie bei sequentiellen Fähigkeitsabläufen kann hierbei ebenfalls eine Schnittmengenbildung der Merkmalausprägungen bei der Zusammenführung notwendig sein. Bei parallelen Abläufen können jedoch des Weiteren Merkmale existieren, deren Ausprägungen bei der Zusammenführung nicht durch eine Schnittmengenbildung generiert werden können. Die Ausprägungen solcher Merkmale müssen dann beispielsweise durch eine Vereinigung der zusammenzuführenden Merkmalausprägungen oder anderen Regeln, wie beispielsweise Maximin- oder Minimaxregel (siehe [SCH05]), bestimmt werden. Die Zusammenführung von Eingangs- und Ausgangsobjekten bei parallelen Fähigkeitsabläufen soll anhand des folgenden Beispiels veranschaulicht werden.

Angenommen, das vorgestellte Bohrmodul würde die Transportfähigkeit des Rundschalttisches und die Bohrfähigkeit der Bohrstation parallel ausführen können und beide Teilfähigkeiten bearbeiten dabei dasselbe Produkt. Abbildung 6-7 visualisiert das Fähigkeitsmodell auf Ebene der Teilfähigkeiten. In der Abbildung ist zu erkennen, dass das Eingangsprodukt *Rohmaterial* parallel transportiert und gebohrt wird. Aufgrund dessen ist das Produkt *Rohmaterial* eine Zusammenführung der beiden Produkte *Eingangsmaterial* und *Eingangsprodukt*, die jeweils in den Transportprozess bzw. den Bohrprozess eingeführt werden (siehe Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5). Dementsprechend besitzt das Produkt *Rohmaterial* alle Merkmale der beiden zusammengeführten Produkte. Da die beiden zusammengeführten Produkte in diesem Beispiel unterschiedliche Merkmale besitzen, können die Merkmalausprägungen ohne Änderungen übernommen werden. Des Weiteren ist in Abbildung 6-7 dargestellt, dass das Ausgangsprodukt *VerarbeitetesProdukt* aus der parallelen Ausführung der zwei Fähigkeiten entsteht. Dementsprechend ist dieses Produkt eine Zusammenführung der beiden Ausgangsprodukte der einzelnen Fähigkeiten und beinhaltet die Merkmale der Produkte *TransportiertesProdukt* und *Ausgangsprodukt*. Hierbei besitzen die zusammenzuführenden Ausgangsprodukte beide das Merkmal *Bearbeitungszeit* in unterschiedlichen Ausprägungen. Die resultierende Ausprägung der *Bearbeitungszeit* beträgt in diesem Beispiel 2 bis 3 Sekunden. Die kürzeste *Bearbeitungszeit* beträgt hierbei 2 Sekunden, da selbst wenn die Bohrfähigkeit schneller als 2 Sekunden ausgeführt wird, die Transportfähigkeit immer noch die 2 Sekunden benötigt. Die längste *Bearbeitungszeit* hingegen beträgt 3 Sekunden, da dies das Maximum der Bohrfähigkeit ist und dieser Wert die 2 Sekunden der Transportfähigkeit übersteigt. Folglich musste in diesem Beispiel bei der Bestimmung der resultierenden Ausprägung der *Bearbeitungszeit* das maximale Minimum sowie das maximale Maximum aus den zusammenzuführenden Ausprägungen ermittelt werden und konnte nicht durch eine Schnittmengenbildung bestimmt werden.

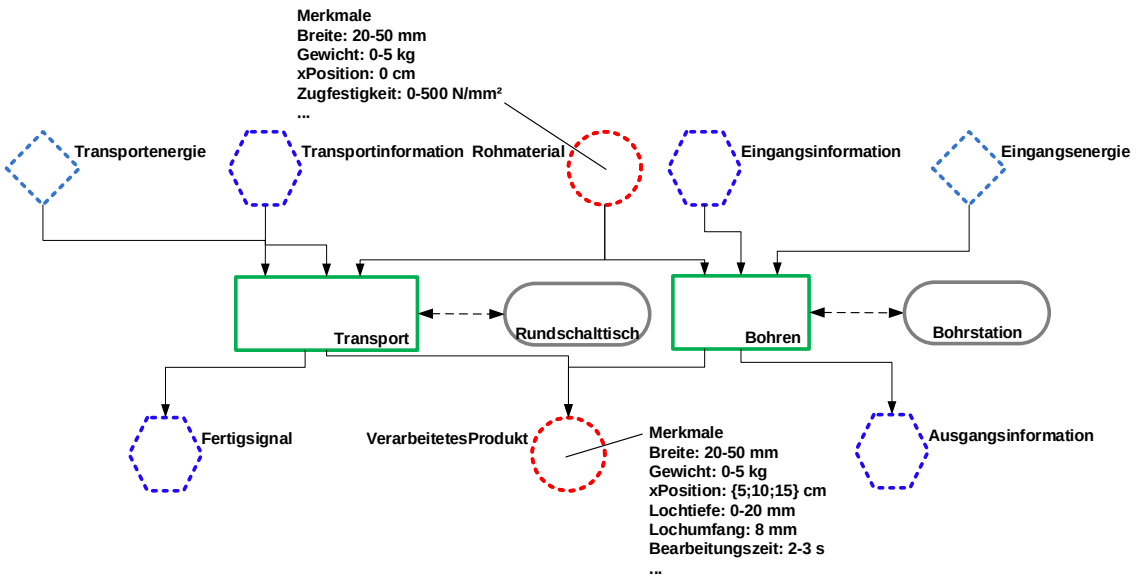

Abbildung 6-7 Schematische Darstellung des Fähigkeitsmodells (Dekomposition) bei paralleler Ausführung der Fähigkeiten des Rundschalttisches und der Bohrstation

Abhängigkeiten bei der Komposition/Dekomposition von Fähigkeiten

Die Abhängigkeiten, die einen Einfluss auf die Merkmalausprägungen der Teilfähigkeiten einer komponierten Fähigkeit aufweisen können, können zwischen den Prozessen oder zwischen den technischen Ressourcen der Teilfähigkeiten bestehen und resultieren aus der Komposition der Teilsysteme. Erstere Abhängigkeiten, die zwischen Prozessen herrschen, sind beispielsweise Prozessabhängigkeiten, die eingeführt werden, um die Prozesssicherheit von parallel ablaufenden Prozessen zu gewährleisten. Im oben beschriebenen Beispiel für die parallele Ausführung von Teilfähigkeiten könnte beispielsweise eine Abhängigkeit innerhalb der komponierten Fähigkeit des Bohrmoduls eingeführt werden, die die Bewegungsgeschwindigkeiten des Transportprozesses und Bohrprozesses miteinander abstimmt, damit die Teilprozesse parallel ablaufen können. Zweitere Abhängigkeiten, die zwischen den Ressourcen der Teilfähigkeiten bestehen, können aus den beschriebenen Abhängigkeitskategorien aus Unterkapitel 3.2.3 resultieren und können dementsprechend räumliche, mechanische, energetische, informationstechnische oder logische Ursachen haben. Im oben beschriebenen Bohrmodul besteht beispielsweise eine räumliche Abhängigkeit zwischen den beiden technischen Ressourcen *Rundschalttisch* und *Bohrstation*, die die Fähigkeit der Bohrstation hinsichtlich der *Lochtiefe* des Ausgangsprodukts beeinträchtigt. Hierbei besteht die Abhängigkeit darin, dass die vertikale Bewegung der Bohrstation beschränkt wird durch die Tischplatte des Rundschalttisches, da der Bohrer die Tischplatte beim Bohrvorgang nicht beschädigen darf. Aufgrund dessen besitzt die Bohrstation im aggregierten System die Fähigkeit ein Ausgangsprodukt zu fertigen, das eine *Lochtiefe* von 0 bis 15 Millimeter besitzt, anstatt der eigentlichen *Lochtiefe* von 0 bis 20 Millimeter (siehe Abbildung 6-4). Dementsprechend müssen für die Erstellung der Beschreibung von komponierten Fähigkeiten die beschriebenen Abhängigkeiten bekannt sein. Die Modellierung dieser Abhängigkeiten wird in Kapitel 7 erläutert.

Modellierungsmöglichkeiten von komponierten Fähigkeiten

Für die Modellierung von komponierten Fähigkeiten werden im Folgenden zwei Möglichkeiten vorgestellt und kurz diskutiert.

Möglichkeit 1 - „Black-Box“: In der ersten Modellierungsmöglichkeit werden alle Eingangs- und Ausgangsobjekte der Teilfähigkeiten aus der Dekompositionsdarstellung zusammengefasst, um daraus die

Eingangs- und Ausgangsobjekte der komponierten Fähigkeit zu beschreiben. Hierbei ist zu beachten, dass in der Dekompositionsbeschreibung bereits die beschriebenen Besonderheiten und Abhängigkeiten berücksichtigt sein müssen, um die komponierte Fähigkeit korrekt zu beschreiben. Bei dieser Modellierungsmöglichkeit müssen die Objekte der Teilfähigkeiten in der Dekompositionsbeschreibung zu einem Objekt bei der Modellierung der aggregierten Fähigkeit zusammengeführt werden, sofern diese Objekte auf ein gemeinsames Eingangs- bzw. Ausgangsobjekt in der komponierten Fähigkeit zurückzuführen sind. Bei diesem Vorgang können weitere Merkmalzusammenführungen auftreten. Im oben genannten Beispiel des Bohrmoduls (siehe Abbildung 6-6) würde die Anwendung dieser Modellierungsmöglichkeit dazu führen, dass das Eingangsprodukt *Eingangsmaterial* der aggregierten Fähigkeit mittels der Merkmale des Eingangsprodukts der Fähigkeit des Rundschalttisches sowie des Eingangsprodukts der Bohrstation beschrieben wird, da aufgrund der sequentiellen Bearbeitung diese beiden Eingangsprodukte auf ein gemeinsames Eingangsprodukt in der aggregierten Fähigkeit zurückzuführen sind. Hierbei wäre das betrachtete Eingangsprodukt der Bohrstation das Produkt *Zwischenprodukt*. Folglich wäre das Eingangsprodukt *Eingangsmaterial* der komponierten Fähigkeit nicht gleichzusetzen mit dem Eingangsprodukt der Transportfähigkeit in dieser Modellierungsmöglichkeit, auch wenn beide in Abbildung 6-6 die gleiche Bezeichnung besitzen. Beispielsweise würde das Eingangsprodukt der komponierten Fähigkeit das Merkmal *Zugfestigkeit* besitzen, was das Eingangsprodukt der Transportfähigkeit nicht besitzt. Analog zu den Eingangsprodukten würde das Ausgangsprodukt des Bohrmoduls anhand der Merkmale des Ausgangsprodukts der Fähigkeit des Rundschalttisches sowie des Ausgangsprodukts der Bohrstation beschrieben werden. Die Eingangsobjekte *Transportenergie* und *Eingangsenergie* hingegen würden bei der Anwendung dieser Modellierungsmöglichkeit als einzelne Eingangsobjekte in der aggregierten Fähigkeit modelliert werden, da diese nicht auf eine Eingangsenergie zurückzuführen sind. Der Vorteil dieser Modellierungsmöglichkeit besteht darin, dass die komponierte Fähigkeit allein durch die Beschreibung ihrer Eingangs- und Ausgangsobjekte beschrieben werden kann. Die Dekompositionsbeschreibung wird lediglich für die Erstellung des komponierten Fähigkeitsmodells benötigt und muss nicht zwangsläufig Teil der Beschreibung sein. Dementsprechend kann die komponierte Fähigkeit als eine Art „Black-Box“ ausschließlich anhand ihrer Eingangs- und Ausgangsobjekte modelliert werden, wodurch das Modell eine geringe Komplexität besitzt. Diese Modellierungsmöglichkeit führt jedoch dazu, dass die Eingangs- und Ausgangsobjekte der aggregierten Fähigkeit nicht den Objekten an der Systemgrenze in der Dekompositionsbeschreibung entsprechen, was gegen die Dekompositionsregel der *Formalisierten Prozessbeschreibung* verstößt. Ein weiterer Nachteil dieser Modellierungsmöglichkeit ist, der Aufwand hinsichtlich der zusätzlichen Zusammenführung der Objekte zu einem Eingangs- bzw. Ausgangsobjekt im komponierten Fähigkeitsmodell. Dieser Vorgang kann bei komponierten Fähigkeiten, die aus einer Vielzahl an Teilfähigkeiten bestehen, sehr hoch sein.

Möglichkeit 2 - „White-Box“: Diese Modellierungsmöglichkeit beschreibt die komponierte Fähigkeit als „White Box“ und besteht aus einer Schnittstellenbeschreibung, der die Eingangs- und Ausgangsobjekte der komponierten Fähigkeit beschreibt, und der Dekompositionsbeschreibung. Die Modellierungsmöglichkeit für die Modellierung von komponierten Fähigkeiten folgt der Dekompositionsregel der *Formalisierten Prozessbeschreibung*. Dementsprechend sind die Beschreibungen der Eingangs- und Ausgangsobjekte in der Schnittstellenbeschreibung des komponierten Fähigkeitsmodells identisch mit den Beschreibungen der Eingangs- und Ausgangsobjekten an der Systemgrenze in der Dekompositionsbeschreibung. Auch bei dieser Modellierungsmöglichkeit ist zu beachten, dass in der Dekompositionsbeschreibung bereits die beschriebenen Besonderheiten und Abhängigkeiten berücksichtigt sein müssen, um die komponierte Fähigkeit korrekt zu beschreiben. Im Bohrmodulbeispiel würde die

Anwendung dieser Modellierungsmöglichkeit dazu führen, dass das Eingangsprodukt in der Schnittstellenbeschreibung des komponierten Fähigkeitsmodells identisch mit dem Eingangsprodukt der Transportfähigkeit ist und folglich ausschließlich dessen Merkmale besitzt. Das Merkmal *Zugfestigkeit*, welches die Anforderung an das Eingangsprodukt der Bohrfähigkeit beschreibt, wird im Eingangsprodukt der Übersichtsdarstellung der komponierten Fähigkeit nicht berücksichtigt und ist erst relevant beim *Zwischenprodukt* in der Dekompositionsbeschreibung. Die ausschließliche Analyse des Eingangsprodukts der Schnittstellenbeschreibung würde dementsprechend hierbei zu dem Trugschluss führen, dass das Bohrmodul sämtliche Produkte verarbeiten kann ungeachtet derer Zugfestigkeit. Aufgrund dessen ist es bei dieser Modellierungsmöglichkeit nicht ausreichend die Eingangs- und Ausgangsobjekte der Schnittstellenbeschreibung der komponierten Fähigkeitsmodelle zu analysieren, um eine vollständige Aussage über die komponierte Fähigkeit zu treffen. Um eine vollständige Fähigkeitsanalyse durchzuführen, ist es hierbei folglich notwendig alle Produkt-, Information- und Energieobjekte in der Dekompositionsbeschreibung zu analysieren, um korrekte Aussagen über die komponierte Fähigkeit zu treffen.

Der Vorteil dieser Modellierungsmöglichkeit ist, dass die Modellierung konform mit der Dekompositionsregel der *Formalisierten Prozessbeschreibung* ist. Daher können Anwender, die bereits mit der FPB vertraut sind, das Modellierungskonzept bezüglich der Komposition und Dekomposition der Fähigkeiten einfacher verstehen. Ein weiterer Vorteil dieser zweiten Modellierungsmöglichkeit gegenüber der ersten Modellierungsmöglichkeit ist, dass kein zusätzlicher Aufwand für die Erstellung der Beschreibung der Eingangs- und Ausgangsobjekte im komponierten Fähigkeitsmodell benötigt wird. Im Vergleich zur ersten Modellierungsmöglichkeit ist diese Modellierungsmöglichkeit jedoch weniger kompakt, da sie aus zwei Teilen besteht. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Analyse der komponierten Fähigkeit tendenziell mehr Zeit im Vergleich zur Black-Box-Modellierung benötigt, da die Dekompositionsbeschreibung stets mit analysiert werden muss.

Beide vorgestellten Modellierungsmöglichkeiten für komponierte Fähigkeiten sind bezüglich ihres Informationsgehalts äquivalent. Im späteren Verlauf dieser Arbeit wird jedoch die zweite Modellierungsmöglichkeit für die Darstellung der komponierten Fähigkeiten genutzt, um die Konformität mit der *Formalisierten Prozessbeschreibung* zu wahren und den Modellierungsaufwand geringer zu halten.

6.2 Beschreibungsmittel zur Abbildung der Fähigkeitsmodellierung

In diesem Unterkapitel werden vier verschiedene Beschreibungsmittel präsentiert und erläutert, die sich bezüglich der Darstellung von Fertigungsfähigkeiten in der Forschung bereits bewährt haben und sich ebenfalls potentiell zur Abbildung der vorgestellten Fähigkeitsmodellierung eignen. Zu diesen Beschreibungsmitteln gehören die *Formalisierte Prozessbeschreibung* (FPB), *Systems Modeling Language* (SysML), *Automation Markup Language* (AML) und die *Web Ontology Language* (OWL).

6.2.1 Formalisierte Prozessbeschreibung (FPB)

Die formalisierte Prozessbeschreibung verfolgt das Ziel, eine einfache, branchenneutrale, leicht verständliche und über den gesamten Lebenslauf eines Systems verwendbare Beschreibung des technischen Prozesses zu gewährleisten [VDI/VDE 3682]. Die Objekte der FPB sowie deren Zusammenhänge wurden bereits in Unterkapitel 3.1 beschrieben, da das Systemverständnis der FPB als Grundlage für das entwickelte Fähigkeitsmodellierungskonzept dient. Die FPB beschreibt den technischen Prozess in einer grafischen Darstellungsform und auf einer abstrakten Ebene. Zusätzlich wird in der Richtlinie [VDI/VDE 3682] ein Informationsmodell für die FPB vorgesehen, welches die Objekte der FPB sowie

deren Beziehungen zueinander mit Merkmalen spezifiziert. Die Darstellungsform der Merkmale wird jedoch nicht beschrieben. Neben der grafischen Darstellungsform ist ebenfalls eine Darstellungsform basierend auf der Extensible Markup Language (XML) in Planung, jedoch bislang noch nicht vorhanden [VDI/VDE 3682]. Obwohl die FPB ursprünglich für die Prozessmodellierung entwickelt wurde, existieren in der Fachliteratur verschiedene Ansätze, die die FPB ebenfalls zur Beschreibung des funktionalen Ablaufs von technischen Systemen im Bereich der Produktion nutzen, wie beispielsweise in [HADI14] und [SCH18] vorgestellt. Aufgrund der einfachen grafischen Darstellungsform ist die FPB ein gut verständliches Beschreibungsmittel und einfach anzuwenden. Jedoch besitzt die FPB bislang einen geringen Formalisierungsgrad sowie keine Alternative zur grafischen Darstellungsform, wie z.B. textuelle oder mathematisch-symbolische Darstellungsform, was die Maschinenlesbarkeit des Beschreibungsmittels stark verringert.

6.2.2 System Modeling Language (SysML)

SysML ist ein standardisiertes grafisches Beschreibungsmittel, das zur Abbildung und Analyse von Systemen dient, die aus physischen Komponenten, softwaretechnischen Komponenten, Daten, Personen, Einrichtungen oder natürlichen Objekten bestehen können [DEL14; OBJ15@]. SysML basiert auf der Unified Modeling Language (UML) und besteht aus den folgenden neun Diagrammen [WEI14]: *Anforderungsdiagramm*, *Aktivitätsdiagramm*, *Sequenzdiagramm*, *Zustandsdiagramm*, *Anwendungsfalldiagramm*, *Blockdefinitionsdiagramm*, *Internes Blockdiagramm*, *Zusicherungsdiagramm* und *Paketdiagramm*. Darüber hinaus können die Diagramme als *Struktur-, Anforderungs-* und *Verhaltensdiagramm* klassifiziert werden. Die Taxonomie der SysML-Diagramme ist in Abbildung 6-8 dargestellt. Erstgenannte Diagrammklassen können dafür genutzt werden, um die Elemente sowie den strukturellen Aufbau eines Systems abzubilden. Mit dem *Anforderungsdiagramm* können funktionale sowie nicht-funktionale Anforderungen an ein System abgebildet werden. Diagramme aus der Klasse der *Verhaltensdiagramme* können verwendet werden, um Abläufe oder Prozesse eines Systems darzustellen. Aufgrund des großen Umfangs von SysML wird für eine detaillierte Beschreibung der Diagramme an dieser Stelle auf [WEI14], [FMS15] und [DEL14] verwiesen. Mittels der Vielfalt an Diagrammen können verschiedenste Aspekte eines Systems mit SysML abgebildet werden. Zur Abbildung der Fähigkeit des Systems könnten beispielsweise Prozessabläufe mit *Sequenzdiagrammen* dargestellt werden. Die dazugehörigen Systemobjekte und deren Beziehungen zueinander könnten wiederum in einem *internen Blockdiagramm* abgebildet werden. Für die Erstellung und Editierung von SysML-Diagrammen gibt es verschiedene kommerzielle Softwarewerkzeuge wie beispielsweise *Enterprise Architect* oder *Capella* [FMS15]. Für den dateibasierten Austausch der grafischen Diagramme bieten manche Softwarewerkzeuge die Möglichkeit an, die Diagramme in das standardisierte und textbasierte eXtensible Markup Language Metadata Interchange (XMI) Format zu überführen [FMS15]. Jedoch bieten nicht alle Softwarewerkzeuge die Überführung in das XMI-Format an, da SysML im Grundsatz ein grafisches Beschreibungsmittel ist.

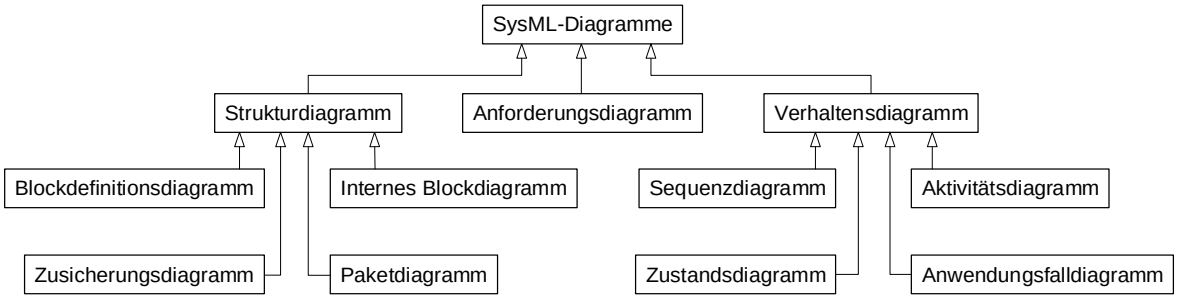

Abbildung 6-8 Taxonomie SysML-Diagramme nach [WEI14]

6.2.3 Automation Markup Language (AML)

AML ist ein neutrales Datenaustauschformat und verfolgt das Ziel, heterogene Werkzeuge aus den Disziplinen Maschinenbau, Elektrokonstruktion, Verfahrenstechnik, Prozessleittechnik, Human-Machine Interface (HMI)-Entwicklung, SPS- und Roboterprogrammierung miteinander nahtlos zu verbinden [DRA10]. AML nutzt das Metamodel von Computer-Aided Engineering Exchange (CAEX) entsprechend der [DIN EN 62424] und basiert demzufolge auf XML [SCH18]. Im Kern besteht AML aus den fünf Teilen *RoleClassLibrary*, *SystemUnitClassLibrary*, *InterfaceClassLibrary*, *AttributeLibrary* und *InstanceHierarchy* [AUT18@].

Die Objekte in der *RoleClassLibrary* stellen Objektrollen dar, die eine abstrakte Beschreibung von physikalischen oder logischen Systemobjekten sind. Im Gegensatz dazu stellen die Objekte in der *SystemUnitClassLibrary* konkrete physikalische oder logische Systemobjekte dar. Dementsprechend beschreibt eine *SystemUnitClass* die konkrete technische Realisierung des Systemobjekts einschließlich ihrer internen Strukturen. Die *InterfaceClassLibrary* beinhaltet Objekte, die Schnittstellenarten eines Systemobjektes darstellen. Diese können genutzt werden, um Beziehungen zwischen den Systemobjekten abzubilden. Die *InstanceHierarchy* repräsentiert eine Instanz eines Systems und besteht aus *InternalElements*, die die Komponenten des Systems darstellen, einschließlich der Schnittstellen (*Interfaces*) der Komponenten, die mithilfe von *InternalLinks* logisch verbunden werden, um die Beziehungen zwischen den *InternalElements* abzubilden. Die *InternalElements* besitzen eine Rolle aus der *RoleClassLibrary* und können eine Referenz zu einer *SystemUnitClass* aufweisen. Seit der Erscheinung von CAEX Version 3 besitzt AML zusätzlich die *AttributeLibrary*, die Attributtypen enthält, womit die Objekte in AML spezifiziert werden können. Darüber hinaus erlaubt AML ebenfalls die Anbindung von anderen Datenformaten wie beispielsweise PLCopenXML und COLLADA, um Informationen bezüglich der Ablaufsteuerung und Geometrie sowie Kinematik zu integrieren. Für eine detaillierte Beschreibung von AML wird an dieser Stelle auf [DRA10] und [AUT18@] verwiesen.

AML wurde praxisnah als Lösung für die Automatisierungstechnik sowie anderen Disziplinen entworfen und bietet Möglichkeiten, die Daten und Informationen von Systemen über den gesamten Lebenszyklus konsistent zu beschreiben. Die Erstellung und Editierung von AML-Dateien können mithilfe des *AutomationML-Editors* effizient durchgeführt werden. Alternativ kann die Bearbeitung der AML-Dateien auch mit einem beliebigen Texteditor erfolgen. Aufgrund der Offenheit und Flexibilität von AML wird das Datenaustauschformat in der Praxis zunehmend häufiger genutzt [BBM+15]. Im Vergleich zur Web Ontology Language besitzt AML jedoch einen geringen Formalisierungsgrad sowie eine geringere Expressivität, wodurch es in AML aufwändiger ist komplexes Wissen semantisch eindeutig zu beschreiben.

6.2.4 Web Ontology Language (OWL)

OWL wurde basierend auf dem Resource Description Framework (RDF) entwickelt und nutzt die Syntax und das Beschreibungsschema von RDF bzw. RDF-Schema [YU15]. Dementsprechend besitzt OWL eine Graphenstruktur und beschreibt Informationen durch sog. Tripel, die jeweils aus einem Subjekt, Prädikat und Objekt bestehen [ANT12]. Innerhalb von OWL gibt es die drei Sprachen OWL Lite, OWL DL, und OWL Full, die sich lediglich in ihrer Expressivität unterscheiden [USC18]. OWL wurde dafür entwickelt, um umfangreiches Wissen über Dinge sowie Gruppen von Dingen und ihre Beziehungen semantisch eindeutig zu beschreiben und ist eine Empfehlung des World Wide Web Consortium (W3C) [DEN12]. Mittlerweile ist OWL die meistgenutzte Sprache auf dem Gebiet der Ontologien [USC18]. In OWL können wie im RDF-Schema Klassen sowie Individuen beschrieben werden. Im Gegensatz zu RDF und RDF-Schema können in OWL Eigenschaften der Transitivität, Symmetrie und des Inversen sowie Beschränkungen bezüglich der Existenz und Kardinalitäten von Beziehungen beschrieben werden [DEN12]. Dementsprechend verfügt OWL über eine höhere Expressivität als RDF oder RDF-Schema. Darüber hinaus besitzt OWL einen hohen Formalisierungsgrad und ermöglicht das Inferieren von impliziten Wissen (auch Reasoning genannt) [YU15]. Aufgrund der hohen Expressivität kann ein vollständiges Reasoning jedoch nicht immer gewährleistet werden [STST04]. Außerdem können Informationen in einer OWL-Ontologie mithilfe von Abfragesprachen, wie z.B. der SPARQL Protocol and RDF Query Language, effizient extrahiert werden. OWL kann in verschiedenen textuellen Formaten wie beispielsweise in RDF/XML oder Turtle gespeichert und ausgetauscht werden [YU15]. Für die Erstellung und Bearbeitung von OWL-Ontologien werden verschiedene kostenlose sowie kommerzielle Softwarewerkzeuge angeboten, wie z.B. *Protégé* oder *TopBraid Composer*. Da OWL allgemein darauf abzielt Wissen als Ontologie zu beschreiben, können verschiedenste Systemaspekte in OWL abgebildet werden. Wie bereits im Stand der Forschung beschrieben (siehe Unterkapitel 4.2.1), existieren hierbei ebenfalls diverse Forschungsansätze, die OWL zur Beschreibung von Fertigungsfähigkeiten nutzen. Jedoch findet OWL aktuell außerhalb der Forschung nur selten Anwendung [USC18].

6.3 Auswahl eines geeigneten Beschreibungsmittels

In diesem Unterkapitel wird ein geeignetes Beschreibungsmittel für die vorgestellte Fähigkeitsmodellierung ausgewählt. Hierfür werden zunächst die Bewertungskriterien an ein solches Beschreibungsmittel dargelegt. Anschließend werden die vorgestellten Beschreibungsmittel aus Unterkapitel 6.2 anhand der eingeführten Kriterien bewertet. Auf Basis dessen wird ein geeignetes Beschreibungsmittel zur Abbildung des vorgestellten Fähigkeitsmodellierungskonzepts ausgewählt. Die Bewertungskriterien für das auszuwählende Beschreibungsmittel werden anhand der gestellten Anforderungen aus Unterkapitel 2.5 und der Fachliteratur abgeleitet. Darüber hinaus ergeben sich weitere Bewertungskriterien aus dem vorgestellten Modellierungskonzept selbst.

Aufgrund der gestellten Anforderung 5 aus Unterkapitel 2.5 wird das Bewertungskriterium der Maschineninterpretierbarkeit des Beschreibungsmittelformats abgeleitet, da dieses Kriterium entscheidend ist, um die geforderte automatisierte Auswertbarkeit des Fähigkeitsmodells zu gewährleisten. Aufgrund des Aggregations- und Dekompositionsaspektes im vorgestellten Modellierungskonzept ist ein weiteres Bewertungskriterium, die Abbildbarkeit von Komposition und Dekomposition nach [VDI/VDE 3681]. In diesem Zusammenhang ist es ebenfalls notwendig, dass das Beschreibungsmittel Hierarchien nach [VDI/VDE 3681] abbilden kann, was ein weiteres Bewertungskriterium darstellt. Darüber hinaus ergibt sich aus dem beschriebenen Modellierungskonzept das Kriterium, dass das Be-

schreibungsmittel die PPR-Zusammenhänge darstellen und ebenfalls die Informations- und Energieobjekte berücksichtigen kann. Aus der Analyse der Fachliteratur ergibt sich zudem das Kriterium, dass das Beschreibungsmittel eine Möglichkeit bieten sollte die verschiedenen ingenieursdisziplinspezifischen Sichten abzubilden und zu verbinden. Dieses Kriterium erleichtert in Zusammenhang mit technischen Änderungsprojekten den Informationsaustausch in den späteren Prozessphasen der technischen Änderung, wie beispielsweise der Implementierungsplanungs- und Implementierungsphase [BBL+16]. Demzufolge ist es in Hinblick auf den gesamten technischen Änderungsprozess vorteilhaft, wenn ein Beschreibungsmittel dieses Kriterium erfüllt. Ein weiteres Bewertungskriterium für die Auswahl des Beschreibungsmittels ist ein hoher Grad an Werkzeugunterstützung. Dieser vereinfacht die Erstellung und Editierung der Modelle [VDI/VDE 3681]. In der Richtlinie [VDI/VDE 3681] werden Werkzeuge anhand ihrer Marktreife in Forschungswerkzeuge, prototypische Werkzeuge und industrielle Werkzeuge unterschieden. Hierbei wird ein umso höherer Werkzeugunterstützungsgrad erreicht, je mehr Werkzeuge mit einer hohen Marktreife für ein Beschreibungsmittel existieren.

Das Bewertungsergebnis der vorgestellten Beschreibungsmittel aus Unterkapitel 6.2 bezüglich der beschriebenen Kriterien ist in Tabelle 6-1 zusammengefasst. In der Tabelle ist zu erkennen, dass die *Formalisierte Prozessbeschreibung* das Kriterium der Maschineninterpretierbarkeit, aufgrund ihrer rein grafischen Darstellungsmöglichkeit, nicht erfüllt. Darüber hinaus erfüllt sie auch nicht die Kriterien bezüglich der Abbildung von disziplinspezifischen Sichten und des hohen Grades der Werkzeugunterstützung. Grund für Ersteres ist, dass die FPB ausschließlich zur Beschreibung von technischen Prozessen entwickelt wurde. Grund für Letzteres ist, dass es aktuell keine dedizierten Softwareanwendungen für die Erstellung und Editierung der FPB existieren. Des Weiteren ist in Tabelle 6-1 zu erkennen, dass SysML das Kriterium der Maschineninterpretierbarkeit nur teilweise erfüllt, da lediglich die Darstellungsform der Diagramme im XMI-Format maschineninterpretierbar ist. Die Exportierung der grafischen Darstellungen der Diagramme in das XMI-Format ist jedoch werkzeugabhängig und wird nicht zwangsläufig von allen Werkzeugen bereitgestellt. Die Abbildung der PPR-Zusammenhänge ist nicht direkt in SysML dargestellt, jedoch können diese anwendungsfallspezifisch modelliert werden. Ähnliches gilt für die Abbildung der disziplinspezifischen Sichten. OWL erfüllt die meisten Kriterien teilweise (siehe Tabelle 6-1). Ein Grund hierfür ist, dass OWL die geforderten Abbildungsaspekte nicht direkt berücksichtigt, jedoch können sie aufgrund der Ausdrucksstärke von OWL ebenfalls abgebildet werden. Beispielsweise kann OWL aufgrund der Graphenstruktur nicht direkt Hierarchien zwischen Individuen abbilden. Allerdings kann hierfür in OWL ein Kantentyp (*ObjectProperty)* definiert werden, der hierarchische Beziehungen zwischen Individuen beschreibt. Bezüglich des Grades der Werkzeugunterstützung erfüllt OWL das Kriterium nur teilweise, da die bestehenden Werkzeuge hinsichtlich ihrer Marktreife maximal prototypische Werkzeuge repräsentieren. Aus Tabelle 6-1 ist ersichtlich, dass AML fast alle geforderten Kriterien vollständig erfüllt. Beispielsweise besitzt AML standardmäßig die *Role-Classes Produkt*, *Prozess* und *Ressource* sowie eine Schnittstellenart für deren Verbindung und erfüllt dadurch das Kriterium hinsichtlich der Abbildung der PPR-Zusammenhänge. Da AML außerdem für den nahtlosen Informationsaustausch zwischen verschiedenen Ingenieursdisziplinen entwickelt wurde und dementsprechend disziplinspezifische Dateiformate integrieren kann, erfüllt das Beschreibungsmittel im Gegensatz zu SysML und OWL ebenfalls das Kriterium bezüglich der disziplinspezifischen Sichten. Lediglich das letzte Kriterium erfüllt AML nur teilweise, da als dedizierte Softwareanwendung für die Erstellung und Editierung von AML ausschließlich der *AutomationML-Editor* existiert und der Editor aktuell noch nicht die Marktreife eines industriellen Werkzeugs besitzt.

Wie der Tabelle 6-1 zu entnehmen ist, stellt AML im Kontext dieser Arbeit das geeignetste Beschreibungsmittel dar, da es alle Bewertungskriterien vollständig erfüllt bis auf ein Kriterium, welches AML

wie zuvor beschrieben jedoch teilweise erfüllt. Aufgrund dessen wird AML für die Abbildung der Fähigkeitsmodellierung ausgewählt. Hierbei ist anzumerken, dass das entwickelte Fähigkeitsmodell rein technisch ebenfalls mit den anderen vorgestellten Beschreibungsmitteln abbildbar wäre, diese jedoch im Kontext dieser Arbeit mehr Nachteile besitzen als AML.

Tabelle 6-1 Bewertung der Beschreibungsmittel zur Abbildung des Fähigkeitsmodellierungskonzepts

	FPB	SysML	AML	OWL
Maschineninterpretierbarkeit	○	◑	●	●
Abbildung Komposition/Dekomposition	●	●	●	◑
Abbildung Hierarchien	●	●	●	◑
Abbildung PPR-Zusammenhänge	●	◑	●	◑
Abbildung disziplinspezifischer Sichten	○	◑	●	◑
Hoher Grad an Werkzeugunterstützung	○	●	◑	◑

○ Nicht erfüllt ◑ Teilweise erfüllt ● Vollständig erfüllt

6.4 Darstellung der Fähigkeitsmodellierung

In jüngerer Vergangenheit wurde in [SCH18] ein Ansatz präsentiert, der die Formalisierte Prozessbeschreibung in AML abbildet. Da die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Fähigkeitsmodellierung auf dem Systemverständnis der *Formalisierten Prozessbeschreibung* basiert, wird für die Abbildung des entwickelten Fähigkeitsmodells auf das AML-Darstellungskonzept der FPB aus [SCH18] zurückgegriffen.

Diesem Darstellungskonzept folgend wird für die Abbildung des Fähigkeitsmodells in AML in der *InstanceHierarchy* ein *InternalElement* angelegt, welches das technische System repräsentiert. Unterhalb dieses *InternalElements* werden ein oder mehrere *InternalElements* erstellt, die die Fähigkeiten des Systems repräsentieren und die Rolle *CapabilityHierachy* besitzen. Ein solches *InternalElement* wiederum besteht aus fünf weiteren *InternalElements*, die die Rollen *ProcessHierarchy, ResourceHierarchy, ProductHierarchy*, *InformationHierarchy*, und *EnergyHierarchy* besitzen. Diese *Hierarchies* spiegeln die fünf Objekttypen der *Formalisierten Prozessbeschreibung* wider und strukturieren die Objekte im AML-Modell. Die Rollennamen indizieren hierbei welchen Objekttypen die jeweilige *Hierarchy* beinhaltet. Beispielsweise beinhaltet das *InternalElement* mit der Rolle *ResourceHierarchy* alle *InternalElements,* die die technischen Ressourcen des Systems repräsentieren. Innerhalb der jeweiligen *Hierarchies* können die *InternalElements* hierarchisch gegliedert werden. Beispielweise kann hierdurch abgebildet werden, aus welchen Teilprozessen ein Prozess besteht. Die Abbildung der Zusammenhänge zwischen den Objekten der FPB in AML werden anhand der Schnittstellenarten *FunctionalUse* und *FunctionalFlow* dargestellt. Erstere Schnittstellenart wird genutzt, um die Nutzungsbeziehung zwischen einer technischen Ressource und eines Prozesses abzubilden. Letztere Schnittstellenart bildet die Beziehungen zwischen Prozessen und dessen Eingangs- und Ausgangsobjekten ab, wobei zwischen *Flow_In*- und *Flow_Out*-Schnittstellen unterschieden wird, um die Beziehungsrichtung darzustellen.

Die Abbildung der Dekomposition erfolgt im Darstellungskonzept anhand der Attribute der Schnittstellenart *FunctionalFlow* und der Hierarchieebene der Objekte. Hierbei besitzen die instanziierten *FunctionalFlow*-Schnittstellen das Attribut *Level*, das die Dekompositionsebene anzeigt. Diese Dekompositionsdarstellung ist konform mit der Richtlinie [VDI/VDE 3682]. Aufgrund der gewählten Modellierungsmöglichkeit von aggregierten Fähigkeiten (siehe Unterkapitel 6.1.2), die ebenfalls mit der Dekompositionsregel der Richtlinie konform ist, kann die Dekompositionsdarstellung in AML aus [SCH18] für die Modellierung der aggregierten Fähigkeiten genutzt werden. Die Merkmale der Objekte und deren Ausprägungen werden in der AML-Darstellung mittels der Attribute der *InternalElements* abgebildet. Die Abbildung der vorgestellten Fähigkeitsmodellierung auf Basis der beschriebenen AML-Darstellung wird im Folgenden anhand des Bohrmodulbeispiels aus Unterkapitel 6.1 näher erläutert.

Abbildung 6-9 zeigt die AML-Darstellung des Fähigkeitsmodells des Bohrmoduls. Hierbei ist zu erkennen, dass das *InternalElement Ressourcenstruktur* die Rolle *ResourceHierarchy* besitzt und die technische Ressource *Bohrmodul* beinhaltet. Des Weiteren ist zu erkennen, dass das *Bohrmodul* aus den technischen Ressourcen *Rundschalttisch* und *Bohrstation* besteht. Analog dazu beinhaltet das *InternalElement Prozessstruktur* den Prozess *AutomatisiertesBohren*, der wiederum aus den Teilprozessen *Transport* und *Bohren* besteht. Die anderen drei *InternalElements Produktstruktur, Informationstruktur* und *Energiestruktur* beinhalten die Eingangs- und Ausgangsobjekte des Fähigkeitsmodells. Abbildung 6-10 zeigt einen Ausschnitt des AML-Modells mit den *Interfaces* der *InternalElements*. In der Abbildung ist beispielsweise zu erkennen, dass der Prozess *AutomatisiertesBohren* die technische Ressource *Bohrmodul* für die Ausführung nutzt, da beide Objekte mit einem *InternalLink* über das *FunctionalUse-Interface* verbunden sind. Gleiches gilt für den Prozess *Transport* und die technische Ressource *Rundschalttisch*. Des Weiteren ist in Abbildung 6-10 zu sehen, dass das Produkt *Eingangsmaterial* in den Prozess *AutomatisiertesBohren* und ebenfalls in den Teilprozess *Transport* eingeführt wird, da diese *InternalElements* jeweils über ihre *FunctionalFlow-Interfaces* verbunden sind. Hierbei besitzt das *Interface Product_Flow_Out* des Produktes *Eingangsmaterial* das Attribut *Level* mit der Ausprägung 0, wohingegen das *Level*-Attribut des *Interfaces Product_Flow_Out_2* die Ausprägung 1 besitzt, da das letztere *Interface* die Verbindung mit einem Teilprozess aus der ersten Dekompositionsstufe darstellt. Zusätzlich sind in der Abbildung die Merkmale des Produktes *Eingangsmaterial* als Attribute dargestellt. Beispielsweise ist hierbei zu erkennen, dass das Produkt *Eingangsmaterial* das Attribut *Breite* besitzt mit dem Wert 20 bis 50 und der Einheit Millimeter.

- InstanceHierarchyBohrmodul
  - SystemBohrmodul {**Role:** ProductionUnit}
    - AutomatisiertesBohren {**Role:** CapabilityHierarchy}
      - Ressourcenstruktur {**Role:** ResourceHierarchy}
        - Bohrmodul {**Role:** FunctionalResource}
          - Bohrmodul-Interfaces
          - Rundschalttisch {**Role:** FunctionalResource}
          - Bohrstation {**Role:** FunctionalResource}
      - Prozessstruktur {**Role:** ProcessHierarchy}
        - AutomatisiertesBohren {**Role:** FunctionalProcess}
          - AutomatisiertesBohren-Interfaces
          - Transport {**Role:** FunctionalProcess}
          - Bohren {**Role:** FunctionalProcess}
      - Produktstruktur {**Role:** ProductHierarchy}
        - Eingangsmaterial {**Role:** FunctionalProduct}
        - Zwischenprodukt {**Role:** FunctionalProduct}
        - Ausgangsprodukt {**Role:** FunctionalProduct}
      - Informationsstruktur {**Role:** InformationHierarchy}
        - Transportinfo {**Role:** FunctionalInformation}
        - Startinformation {**Role:** FunctionalInformation}
        - Ausgangsinformation {**Role:** FunctionalInformation}
      - Energiestruktur {**Role:** EnergyHierarchy}
        - Transportenergie {**Role:** FunctionalEnergy}
        - Eingangsenergie {**Role:** FunctionalEnergy}

Abbildung 6-9 Abbildung des Fähigkeitsmodells des Bohrmoduls in AML - InternalElements

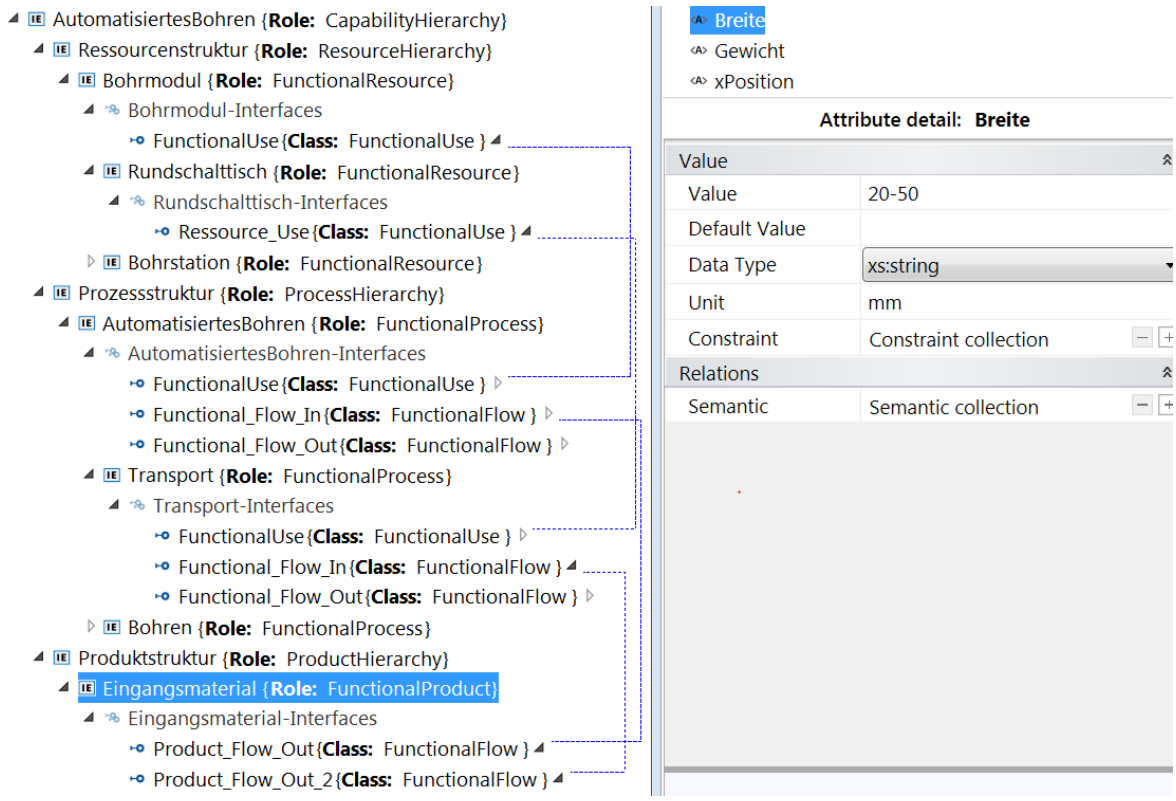

Abbildung 6-10 Ausschnitt des Fähigkeitsmodells des Bohrmoduls in AML – Interfaces und Merkmale

7 Abhängigkeitsmodellierung für die Änderungsmöglichkeitsgenerierung

In diesem Kapitel wird die Abhängigkeitsmodellierung für automatisierte Fertigungssysteme vorgestellt und erläutert. Auf Basis dieser Modellierung werden im späteren Verlauf dieser Arbeit technische Änderungsmöglichkeiten automatisiert generiert. Zu diesem Zweck wird im ersten Unterkapitel 7.1 zunächst das Modellierungskonzept für die Abhängigkeiten zwischen Objekten von automatisierten Fertigungssystemen dargelegt. Anschließend werden in Unterkapitel 7.2, analog zum Aufbau des vorherigen Kapitel 6, verschiedene Beschreibungsmittel vorgestellt. Anhand von verschiedenen Bewertungskriterien wird ein geeignetes Beschreibungsmittel für die Abbildung der Abhängigkeitsmodellierung in Unterkapitel 7.3 ausgewählt. Die Abbildung des Konzepts mittels des ausgewählten Beschreibungsmittels wird in Unterkapitel 7.4 anhand eines Beispiels genauer erläutert. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls die Verknüpfung mit dem in Kapitel 6 vorgestellten Fähigkeitsmodell erörtert.

7.1 Modellierungskonzept für Objektabhängigkeiten

Das vorliegende Modellierungskonzept beschreibt Abhängigkeiten zwischen Objekten von automatisierten Fertigungssystemen auf Merkmalebene. Im Modellierungskonzept wird zwischen zwei Abhängigkeitsarten unterschieden. Die erste Abhängigkeitsart beschreibt Korrelationsbeziehungen zwischen Objektmerkmalen, wohingegen die zweite Abhängigkeitsart Restriktionsbeziehungen zwischen den Objektmerkmalen darstellt. Des Weiteren können die Abhängigkeiten zwischen den Objektmerkmalen qualitativ oder quantitativ beschrieben werden. Hierdurch kann der Modellierungsaufwand der Informationsbasis bei Bedarf verringert werden bzw. kann eine Modellierung auch erfolgen, wenn keine genauen Informationen bezüglich der Abhängigkeiten vorliegen.

Für die qualitative Beschreibung der Korrelationsbeziehungen werden die Ausprägungen *positiv*, *negativ* und *wechselnd* genutzt. Die Ausprägung *positiv* wird hierbei verwendet, um die Korrelationsbeziehung zwischen zwei Merkmalen mathematisch durch eine monoton steigende Funktion zu beschreiben. Die Ausprägung *negativ* wird hingegen verwendet, wenn die Korrelationsbeziehung zwischen zwei Merkmalen mathematisch durch eine monoton fallende Funktion beschrieben wird. Die Ausprägung *wechselnd* wird genutzt, wenn die Korrelationsbeziehung zwischen zwei Merkmalen mathematisch weder durch eine monoton steigende noch als monoton fallende Funktion beschrieben wird.

Für die qualitative Modellierung von Restriktionsbeziehungen werden die Ausprägungen *größer* bzw. *größer-gleich*, *kleiner* bzw. *kleiner-gleich* und *gleich* verwendet. Hierbei werden die Ausprägungen *größer* und *größer-gleich* verwendet, wenn die Verringerung eines Merkmalwertes durch den Wert eines anderen Merkmals beschränkt wird. Dementsprechend werden die Ausprägungen *kleiner* und *kleiner-gleich* genutzt, wenn die Erhöhung eines Merkmalwertes durch den Wert eines anderen Merkmals beschränkt wird. Die Ausprägung g*leich* wird verwendet, um qualitativ zu beschreiben, dass sowohl die Erhöhung als auch die Verringerung eines Merkmalwertes durch den Wert eines anderen Merkmals beschränkt wird. Bei der Beschreibung von Restriktionsbeziehungen wird zusätzlich eine Korrelationsbeziehung mit angegeben, die anzeigt, wie der Wert der Restriktion durch die Änderung des beschränkenden Merkmals angepasst werden kann. Für die quantitative Beschreibung der Korrelations- und Restriktionsbeziehungen werden im vorliegenden Modellierungskonzept mathematische Ausdrücke genutzt. Hierbei ist zu beachten, dass bei Korrelationsbeziehungen lediglich der relevante Term hinsichtlich der korrelierenden Merkmale beschrieben wird und nicht die vollständige Gleichung. In Tabelle 7-1 sind die Abhängigkeitsarten sowie deren Beschreibungen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 7-1 Übersicht der Abhängigkeitsarten und deren Beschreibungen

Abhängigkeitsart	Qualitative Beschreibung	Quantitative Beschreibung
Korrelationsbeziehung	Positiv	Mathematische Formel
	Negativ	
	Wechselnd	
Restriktionsbeziehung	Größer bzw. Größer-gleich	Mathematische Formel
	Kleiner bzw. Kleiner-gleich	
	Gleich	

Das vorliegende Modellierungskonzept basiert außerdem auf den Ausführungen aus Unterkapitel 3.2 und betrachtet dementsprechend Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen folgender Objekttypen:

- Zwischen Produkt, Information, Energie und Prozess
- Zwischen Prozess und technischer Ressource
- Zwischen Prozess und Prozess
- Zwischen technischer Ressource und technischer Ressource

Zusätzlich werden im Modellierungskonzept ebenfalls Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen eines Objekts berücksichtigt. Es ist hierbei wichtig zu beachten, dass lediglich die zuvor genannten Abhängigkeiten zwischen den Objekttypen beschrieben werden, aufgrund des vorliegenden Systemverständnisses (siehe Unterkapitel 3.1), das auf der *Formalisierten Prozessbeschreibung* basiert.

Direkte Abhängigkeiten zwischen einem Eingangsobjekt oder einem Ausgangsobjekt und einer technischen Ressource sind im Modellierungskonzept nicht vorgesehen. Nach dem vorliegenden Systemverständnis sind diese beiden Objekttypen ausschließlich über den Prozess miteinander verbunden und stehen somit in keiner direkten Abhängigkeit zueinander. Abhängigkeiten zwischen diesen Objekttypen würden im Modellierungskonzept demzufolge über den Prozess beschrieben werden. Ähnlich verhält es sich mit den Abhängigkeiten zwischen Eingangs- und Ausgangsobjekten, die nach dem beschriebenen Systemverständnis ebenfalls in keiner direkten Abhängigkeit zueinanderstehen. Abhängigkeiten zwischen den Eingangs- und Ausgangsobjekten müssen dementsprechend ebenfalls über den Prozess beschrieben werden. In dem Fall, wo ein Eingangsobjekt und ein Ausgangsobjekt physisch dasselbe Objekt darstellen, kann dies jedoch dazu führen, dass die Anzahl der zu modellierenden Abhängigkeiten stark ansteigt. Aufgrund dessen, dass das Eingangs- und Ausgangsobjekt physisch dasselbe Objekt sind, können beide Objekte teilweise dieselben Merkmale und Ausprägungen besitzen, da nicht alle Merkmale durch die Ausführung des Prozesses verändert werden. Wenn sich dementsprechend die Ausprägung eines dieser Merkmale im Eingangsobjekt ändert, ändert sich stets die Ausprägung des äquivalenten Merkmals im Ausgangsobjekt im gleichen Verhältnis mit und umgekehrt, da es sich physisch um dasselbe Objekt handelt. Um diese Abhängigkeiten im Modellierungskonzept abzubilden, müssen jeweils zwei positive Korrelationsbeziehungen modelliert werden, die die Abhängigkeit zwischen dem Merkmal des Eingangsobjekts mit dem Merkmal des Ausgangsprodukts über ein Prozessmerkmal beschreiben. Dies kann dazu führen, dass viele Abhängigkeiten modelliert werden, obwohl diese nicht im direkten Zusammenhang mit dem Prozess stehen, sondern nur aufgrund des physischen

Zusammenhangs der Objekte vorhanden sind. Der beschriebene Fall tritt beispielsweise beim Bohrprozess bezüglich der Merkmale *Breite* und *Länge* auf. Hierbei muss modelliert werden, dass das Eingangs- sowie das Ausgangsprodukt stets dieselbe Breite und Länge besitzen, da diese beiden Objekte physisch dasselbe Objekt sind und diese Merkmale nicht vom Bohrprozess verändert werden. Dementsprechend müssen im Abhängigkeitsmodell sowohl für das Merkmal *Breite* als auch für das Merkmal *Länge* jeweils zwei Korrelationsbeziehungen über Prozessmerkmale (z.B. *ProzessBreite* bzw. *ProzessLänge*) abgebildet werden, obwohl diese Merkmale vom eigentlichen Bohrprozess nicht beeinflusst werden. Um die Anzahl der zu modellierenden Abhängigkeiten möglichst gering zu halten, werden im vorliegenden Modellierungskonzept nur Abhängigkeiten beschrieben, die im direkten Zusammenhang mit dem Prozess stehen. Für den erwähnten Fall und die beschriebenen Merkmale werden die Abhängigkeiten zwischen den Eingangs- und Ausgangsobjektmerkmalen nicht explizit modelliert, sondern als gegeben betrachtet.

In der vorliegenden Arbeit werden die Abhängigkeitsmodelle zusammen mit den Fähigkeitsmodellen genutzt, um die Abhängigkeiten zwischen den Objektmerkmalen des Fähigkeitsmodells zu beschreiben. Aufgrund dessen ist im vorliegenden Modellierungskonzept vorgesehen, dass Abhängigkeitsmodelle für Fähigkeiten verschiedener Dekompositionsstufen erstellt werden können. Dies bedeutet, dass einerseits Abhängigkeitsmodelle bestehen, die ausschließlich die Abhängigkeiten zwischen Objektmerkmalen innerhalb einer einzelnen Fähigkeit beschreiben, und andererseits es Abhängigkeitsmodelle gibt, die einer aggregierten Fähigkeit zugeordnet sind und die Abhängigkeiten zwischen den Objektmerkmalen der Teilfähigkeiten beschreiben. Aufgrund dieser Aufteilung steigt die Wiederverwendbarkeit der Abhängigkeitsmodellierung, da die Abhängigkeitsmodelle sowohl für die einzelnen Teilfähigkeiten als auch für nicht komponierte Teilfähigkeiten ihre Gültigkeit besitzen und dementsprechend wiederverwendet werden können.

Die beschriebene Abhängigkeitsmodellierung soll anhand des laufenden Beispiels des Bohrmoduls veranschaulicht werden. Als Ausgangslage sollen hierbei die bereits erwähnten Abhängigkeiten aus dem Beispiel aus Unterkapitel 6.1 dienen. Abbildung 7-1 illustriert ausgewählte Abhängigkeiten der Bohrstation, welche ein Teil des Bohrmoduls ist, nach dem beschriebenen Modellierungskonzept in der qualitativen Darstellung. In der Abbildung ist zu erkennen, dass das Ausgangsproduktmerkmal *Lochtiefe* positiv mit dem Prozessmerkmal *Bohrungstiefe* korreliert, da, wenn die Ausprägung der *Bohrungstiefe* erhöht wird, die Ausprägung der *Lochtiefe* dadurch auch erhöht wird. Gleiches gilt für die Merkmale *Bearbeitungszeit* und *Prozesszeit*. Hierbei ist zu beachten, dass alle Abhängigkeiten im Modell mit Wirkrichtung abgebildet werden. Des Weiteren ist in Abbildung 7-1 dargestellt, dass die Merkmalausprägung *Bohrungstiefe* durch eine *Kleiner-gleich-Restriktion* von der Ausprägung des Ressourcenmerkmals *Spannutlänge* der Komponente *Bohrer* beschränkt wird. Hierbei ist anzumerken, dass die Komponente ein Teil der technischen Ressource *Bohrstation* ist. Zusätzlich wurde bei dieser Abhängigkeit angegeben, dass die Restriktion eine positive Korrelation besitzt. Dies bedeutet, dass sich die Ausprägung dieser Restriktion durch eine Erhöhung der Ausprägung der *Spannutlänge* mit erhöht wird. Ähnlich verhält es sich bei der Restriktionsbeziehung zwischen dem Prozessmerkmal *Vorschubgeschwindigkeit* und dem Ressourcenmerkmal *Geschwindigkeit* der Komponente *VertikalAntrieb,* mit dem Unterschied, dass die Restriktionsbeziehung eine *Gleich-Restriktion* ist. Darüber hinaus ist in der Abbildung zu erkennen, dass das Prozessmerkmal *Prozesszeit* positiv mit dem Ausgangsproduktmerkmal *Lochtiefe* und negativ mit dem Prozessmerkmal *Vorschubgeschwindigkeit* korreliert. Dementsprechend sagen diese Korrelationsbeziehungen aus, dass die Erhöhung der *Lochtiefe* dazu führt, dass die *Prozesszeit* ansteigt, wohingegen die Erhöhung der *Vorschubgeschwindigkeit* zu einer Reduzierung der *Prozesszeit* führt.

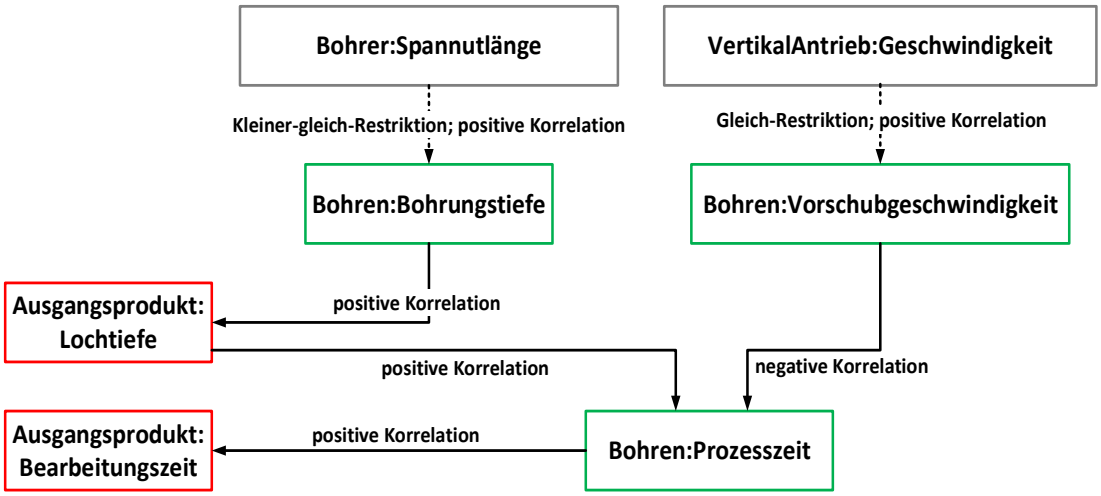

Abbildung 7-1 Schematische Darstellung von qualitativen Abhängigkeiten der Bohrstation

In Abbildung 7-2 werden die Abhängigkeiten aus Abbildung 7-1 quantitativ dargestellt. Beispielsweise ist in der Abbildung zu erkennen, dass das Merkmal *Bohrungstiefe* maximal den Wert der *Spannutlänge* annehmen kann. Darüber hinaus ist festzustellen, dass beispielsweise bei Erhöhung der *Spannutlänge* um eine Einheit ebenfalls die Restriktion für die *Bohrungstiefe* um eine Einheit erhöht wird. Hinsichtlich des Merkmals *Bohrungstiefe* ist weiterhin dargestellt, dass die positive Korrelationsbeziehung zum Ausgangsproduktmerkmal *Lochtiefe* den Faktor 1 besitzt. Dementsprechend würde beispielsweise eine Erhöhung der *Bohrungstiefe* um zwei Einheiten die *Lochtiefe* ebenfalls um zwei Einheiten erhöhen. Des Weiteren ist in Abbildung 7-2 dargestellt, dass die Erhöhung oder Verringerung der *Lochtiefe* den Wert der *Prozesszeit* erhöht bzw. verringert. Der Faktor wird dabei aus 60 dividiert durch die *Vorschubgeschwindigkeit* bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass in dem Ausdruck die Ausprägung der *Vorschubgeschwindigkeit* als fix angenommen wird und ausschließlich die *Lochtiefe* ein Delta besitzt.

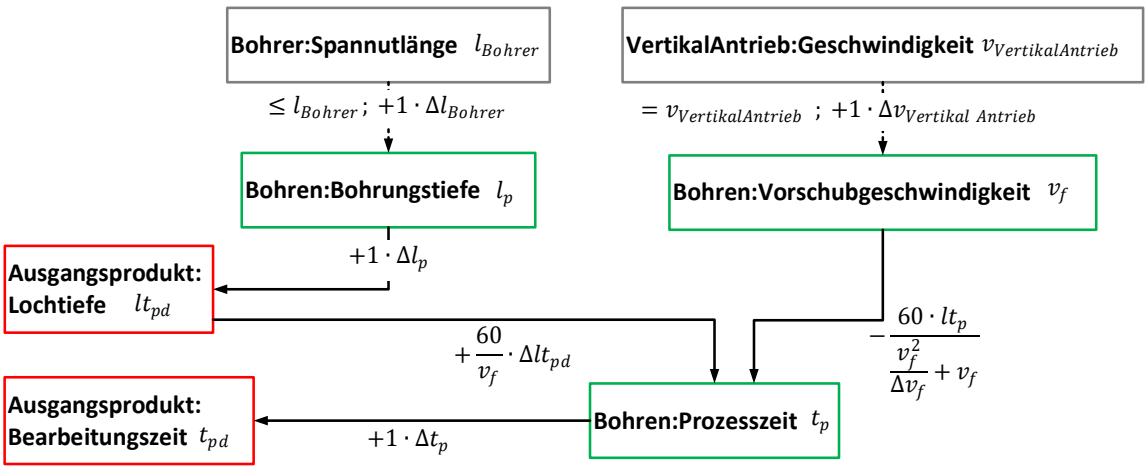

Abbildung 7-2 Schematische Darstellung von quantitativen Abhängigkeiten der Bohrstation

Abbildung 7-3 illustriert beispielhafte Abhängigkeiten auf Ebene der aggregierten Fähigkeit des Bohrmoduls. Hierbei ist zu erkennen, dass aufgrund der Aggregation das Prozessmerkmal *Bohrungstiefe* auf dieser Ebene eine zusätzliche Restriktionsbeziehung mit dem Ressourcenmerkmal *VertikalAbstandBohrerUndTisch* erhält. Das Ressourcenmerkmal beschreibt den Abstand zwischen der z-Position des Tisches und der Bohrerspitze des Bohrers. Hierbei ist der Tisch eine Komponente des Rundschalttisches

und der Bohrer eine Komponente der Bohrstation. Die Restriktionsbeziehung verhindert, dass die Bohrstation im System des Bohrmoduls aufgrund der räumlichen Anordnung den Rundschalttisch beim Bohrprozess beschädigt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass das Merkmal *VertikalAbstandBohrerUnd-Tisch* positiv mit dem Merkmal *ZPosition* der Komponente *Tisch* sowie negativ mit dem Merkmal *BohrerspitzeZPosition* der Komponente *Bohrer* korreliert. Beide Korrelationsbeziehungen besitzen den Faktor 1. Die beschriebenen Abhängigkeiten sind ausschließlich für das Bohrmodulsystem gültig. Bei einer Nutzung der Bohrstation außerhalb des Bohrmoduls können die Abhängigkeiten aus Abbildung 7-2 problemlos wiederverwendet werden, da diese für die Bohrstation nicht an Gültigkeit verlieren.

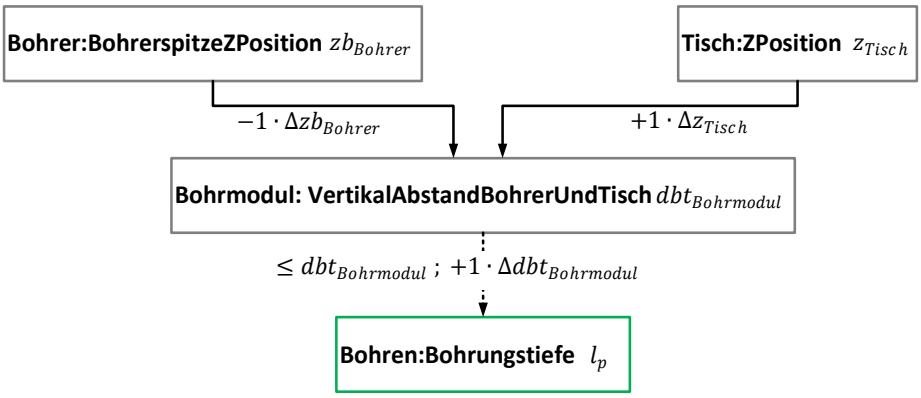

Abbildung 7-3 Schematische Darstellung von quantitativen Abhängigkeiten des Bohrmoduls

7.2 Beschreibungsmittel zur Abbildung der Abhängigkeitsmodellierung

In diesem Unterkapitel werden vier verschiedene Beschreibungsmittel vorgestellt, die sich potentiell für die Darstellung von Abhängigkeiten zwischen Systemmerkmalen eignen und dementsprechend für die Abbildung der vorgestellten Abhängigkeitsmodellierung genutzt werden könnten. Zu diesen Beschreibungsmitteln gehören die *Multiple-Domain Matrix* (MDM), das *Zusicherungsdiagramm* aus SysML, die *Automation Markup Language* und die *Web Ontology Language*.

7.2.1 Multiple-Domain Matrix

Die Multiple-Domain Matrix ist eine Blockmatrix, die die Abhängigkeiten zwischen Systemelementen aus verschiedenen Domänen beschreibt. Die Diagonale der MDM besteht aus Design Structure Matrizen (DSMs), die die Abhängigkeiten innerhalb einer Domäne beschreiben. Die restliche MDM besteht aus Domain Mapping Matrizen (DMMs), die die domänenübergreifenden Abhängigkeiten beschreiben [LMB08].

Abbildung 7-4 zeigt eine Übersicht der MDM mit drei Beispieldomänen. Die Abhängigkeiten in der MDM können als gerichtete Kanten betrachtet werden und besitzen dementsprechend eine Richtung. Hierbei bildet das Zeilenelement die Quelle und das Spaltenelement die Senke der jeweiligen Kante. Demzufolge müssen bidirektionale Abhängigkeiten entlang der Diagonale der MDM oder der jeweiligen DSM innerhalb der MDM gespiegelt werden. Die Abhängigkeiten in der MDM können anhand verschiedener Ausprägungen beschrieben werden, wie beispielsweise binärer, quantitativer oder qualitativer Werte. Des Weiteren kann die MDM ebenfalls verschiedene Abhängigkeitstypen zwischen und innerhalb der Domänen beschreiben. Hierbei werden mehrere DMMs für die Beschreibung der unterschiedlichen Abhängigkeitstypen zweier Domänen verwendet. Analog dazu werden verschiedene DSMs verwendet, um unterschiedliche Abhängigkeitstypen innerhalb einer Domäne zu beschreiben.

In der MDM müssen nicht zwangsläufig alle DSMs und DMMs genutzt werden. Wenn dementsprechend keine Abhängigkeiten zwischen oder innerhalb Domänen existieren, bleiben die dazugehörigen DSMs bzw. DMMs leer. Für eine detailliertere Beschreibung der MDM wird an dieser Stelle auf [LMB08] verwiesen.

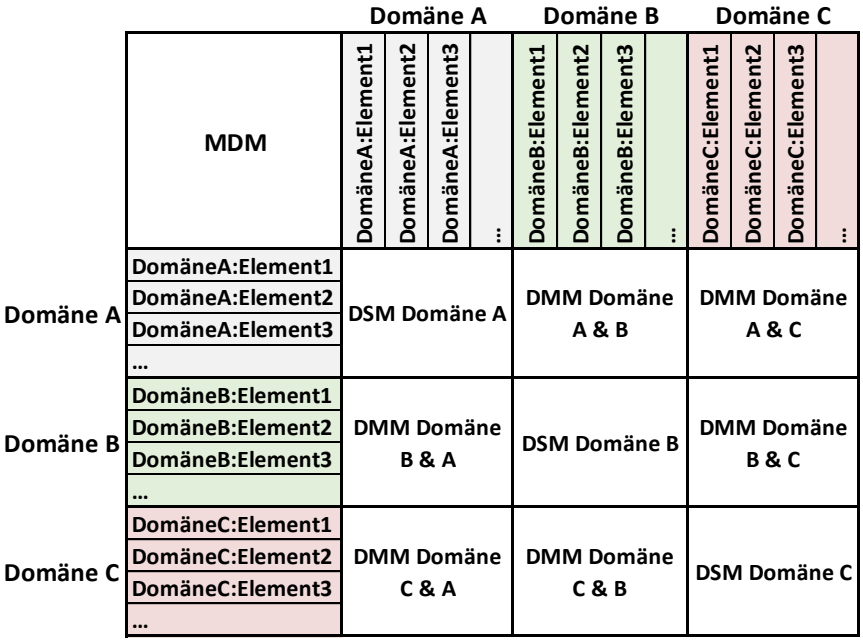

Abbildung 7-4 Übersicht der Multiple-Domain Matrix

In Abbildung 7-5 ist beispielhaft eine MDM mit binären Werten dargestellt. In der abgebildeten MDM ist modelliert, dass *Element2* der *Domäne A* eine Abhängigkeit zu *Element3* aus derselben Domäne sowie zu *Element4* aus *Domäne B* besitzt. Beide Abhängigkeiten sind nicht bidirektional. Des Weiteren ist abgebildet, dass *Element4* aus Domäne A eine bidirektionale Abhängigkeit mit *Element2* der *Domäne B* besitzt. In der Abbildung ist zudem zu erkennen, dass die DMMs zwischen *Domäne A* und *Domäne C* sowie zwischen *Domäne B* und *Domäne C* nicht genutzt werden, da Abhängigkeiten zwischen diesen Domänen in dieser Richtung nicht bestehen. Hierbei ist zu beachten, dass Abhängigkeiten in den gespiegelten DMMs aber möglich sind, wie z.B. die Abhängigkeit zwischen *Element2* der *Domäne C* und *Element3* der *Domäne A*.

Werkzeuge, die dediziert für die Erstellung und Editierung der MDM erstellt wurden, gibt es lediglich in prototypischer Form und werden primär für Forschungszwecke genutzt [SISA18]. Darüber hinaus können auch kommerzielle Werkzeuge zur Erstellung von Tabellen und Matrizen, wie beispielsweise *Microsoft Excel*, genutzt werden, um eine MDM zu erzeugen. Allerdings sind diese Werkzeuge nicht optimiert für die Erstellung und Editierung der MDM. Für den dateibasierten Austausch der MDM können verschiedene textbasierte Dateiformate genutzt werden, wie z.B. *Comma-Separated Values* (CSV), XML oder *Excel-Spreadsheet*. Für die Speicherung der MDM gibt es dabei jedoch keine spezifische oder standardisierte Darstellungsform in den jeweiligen Dateiformaten. Dies bedeutet, dass die MDM in den genannten Formaten meist als herkömmliche Matrix abgespeichert wird.

		Domäne A				Domäne B				Domäne C			
	MDM	**DomäneA:Element1**	**DomäneA:Element2**	**DomäneA:Element3**	**DomäneA:Element4**	**DomäneB:Element1**	**DomäneB:Element2**	**DomäneB:Element3**	**DomäneB:Element4**	**DomäneC:Element1**	**DomäneC:Element2**	**DomäneC:Element3**	**DomäneC:Element4**
Domäne A	**DomäneA:Element1**												
	DomäneA:Element2			X					X				
	DomäneA:Element3												
	DomäneA:Element4						X						
Domäne B	**DomäneB:Element1**												
	DomäneB:Element2				X								
	DomäneB:Element3												
	DomäneB:Element4						X						
Domäne C	**DomäneC:Element1**												
	DomäneC:Element2			X									
	DomäneC:Element3								X				
	DomäneC:Element4											X	

Abbildung 7-5 Beispiel einer MDM

Der Vorteil der MDM ist, dass sie ein kompaktes sowie einfach handhabbares Beschreibungsmittel darstellt und sich bereits häufig in der Forschung für die Modellierung von Abhängigkeiten in komplexen technischen Systemen bewährt hat. Darüber hinaus ist die MDM gut geeignet für strukturelle Analysen des Systems. [RTC+05]

Der Nachteil der MDM ist, dass bei einer hohen Anzahl von Elementen die Erstellung und Editierung der Matrix aufgrund der Unübersichtlichkeit schwierig wird, da die Matrix quadratisch wächst und nicht alle Zellen befüllt werden. Ein weiterer Nachteil der MDM ist, dass kein optimiertes Dateiformat für die Speicherung der MDM existiert.

7.2.2 Zusicherungsdiagramm

Das *Zusicherungsdiagramm* gehört zu den *Strukturdiagrammen* in SysML (siehe Unterkapitel 6.2.2). Anhand des Diagramms können Beziehungen zwischen Merkmalen von Systemkomponenten beschrieben werden. Hierfür werden *Zusicherungsbausteine* genutzt, in denen die Beziehungen zwischen den Merkmalen mit mathematischen Formeln als Zusicherungen beschrieben werden. Innerhalb der Bausteine werden zudem auch die Merkmale der Zusicherungen beschrieben. Die *Zusicherungsbausteine* können im Kontext von *internen Blockdiagrammen* genutzt werden, in welchen die Systemmerkmale mit den *Zusicherungsbausteinen* verbunden werden. Eine detailliertere Beschreibung des *Zusicherungsdiagramms* kann aus [Wei14] oder [FMS15] entnommen werden.

Abbildung 7-6 illustriert ein beispielhaftes *Zusicherungsdiagramm*, in dem zwei Abhängigkeiten modelliert sind. Die erste Abhängigkeit (*Abhängigkeit1*) beschreibt, dass *Merkmal3* aus der Multiplikation der beiden Merkmale *Merkmal1* und *Merkmal2* resultiert. Die zweite Abhängigkeit (*Abhängigkeit2*) beschreibt wiederum, dass *Merkmal5* aus der Addition der Merkmale *Merkmal3* und *Merkmal4* entsteht. Alle Merkmale besitzen im Beispiel den Typ *Integer*. Hierbei ist anzumerken, dass die Abhängigkeiten im Beispiel eine Richtung besitzen in Form ihrer Ein- und Ausgänge. Birektionale Abhängigkeiten müssten dementsprechend in zwei Abhängigkeitsblöcken abgebildet werden.

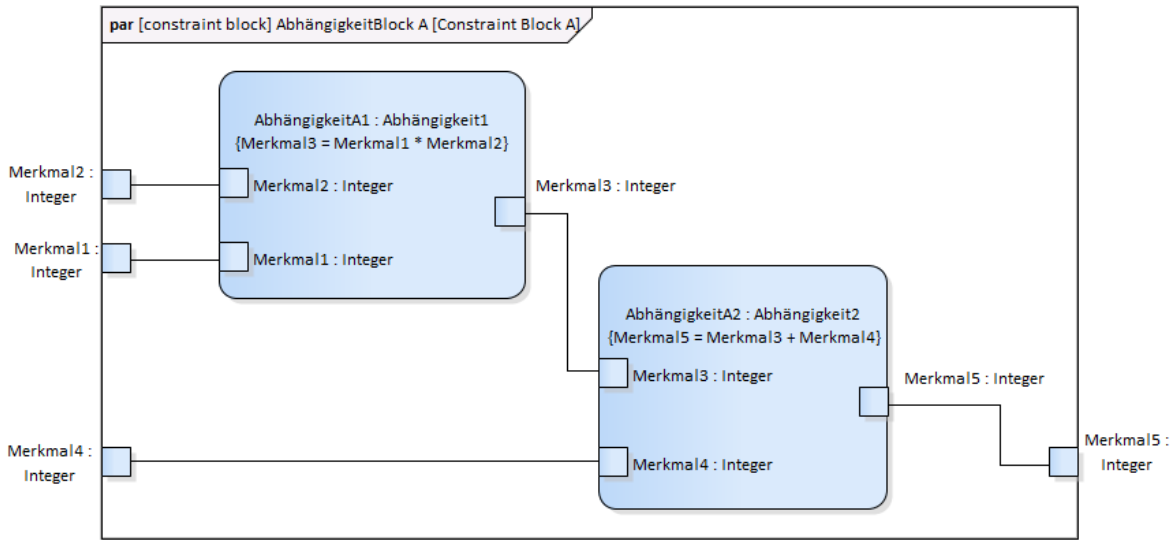

Abbildung 7-6 Beispiel Zusicherungsdiagramm

Für die Erstellung und Editierung der *Zusicherungsdiagramme* können die gleichen kommerziellen Werkzeuge aus Unterkapitel 6.2.2 genutzt werden, da das *Zusicherungsdiagramm* ein Teil von SysML ist. Dementsprechend kann für den dateibasierten Austausch der grafischen Diagramme ebenfalls das XMI-Format genutzt werden. Jedoch gilt auch hier, dass nicht zwangsläufig alle Werkzeuge dieses Format anbieten. Aufgrund der graphischen Darstellung des *Zusicherungsdiagramms* ist das Beschreibungsmittel für den menschlichen Anwender recht leicht verständlich. Die Beschreibung der Abhängigkeiten anhand der Diagramme ist jedoch trotz Werkzeugunterstützung zeitaufwändig im Vergleich zur MDM, da die *Zusicherungsbausteine* angelegt und manuell miteinander verbunden werden müssen.

7.2.3 Automation Markup Language

Die Grundlagen der *Automation Markup Language* wurden bereits in Unterkapitel 6.2.3 erläutert. Hinsichtlich der Modellierung von Abhängigkeiten zwischen Merkmalen ist hierbei noch zu erwähnen, dass AML keine direkte Möglichkeit vorsieht diese Abhängigkeiten zu beschreiben. In AML können Merkmale von Systemkomponenten zwar als *Attribute* beschrieben werden, jedoch können diese *Attribute* nicht in Beziehung zueinander gesetzt werden. Aktuell existiert keine offizielle Erweiterung des AML-Standards für die Modellierung von Abhängigkeiten auf Merkmalebene. Um diese Limitation zu umgehen, könnten die Merkmale einer Systemkomponente in AML als *InternalElements* beschrieben werden. Hierdurch können die Merkmale mit *Interfaces* ausgestattet werden und deren Abhängigkeiten mittels *InternalLinks* abgebildet werden. In Abbildung 7-7 wird die beschriebene Modellierungsmöglichkeit von Abhängigkeiten zwischen Merkmalen in AML dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass *Komponente1* und *Komponente2* jeweils zwei Merkmale besitzen. *Merkmal1* besitzt dabei eine Abhängigkeit zu *Merkmal3*, was durch einen *InternalLink* zwischen den jeweiligen *ExternalInterfaces* dargestellt ist. Gleiches gilt für *Merkmal2* und *Merkmal4*. Die genauen Beschreibungen der Abhängigkeitsinhalte müssen hierbei über *Interfaces* erfolgen, da diese im Gegensatz zu *InternalLinks* mit *Attributen* ausspezifiziert werden können.

Das Problem bei dieser Abhängigkeitsmodellierung zwischen Merkmalen in AML ist, dass sie sehr zeitaufwändig ist und schnell unübersichtlich wird, da jedes Merkmal von einem *InternalElement* und jede Abhängigkeit des Merkmals von einem *Interface* repräsentiert wird.

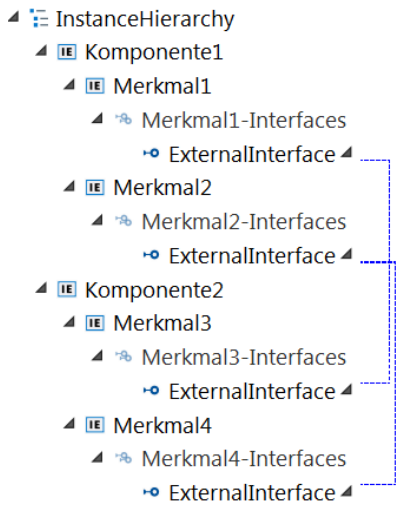

Abbildung 7-7 Modellierungsbeispiel für Abhängigkeiten zwischen Merkmalen in AML

7.2.4 Web Ontology Language

Wie beim vorherigen Beschreibungsmittel wurden die Grundlagen der *Web Ontology Language* bereits im Unterkapitel 6.2.4 dargelegt. Aufgrund der Ausdruckstärke von OWL kann das Beschreibungsmittel ebenfalls dafür genutzt werden, um Abhängigkeiten zwischen Merkmalen zu beschreiben. Eine Möglichkeit diese Abhängigkeiten in OWL darzustellen ist es, die Merkmale als *Individuen* und deren Beziehungen zueinander als *ObjectProperties* abzubilden. Die inhaltliche Beschreibung der Abhängigkeiten kann hierbei ebenfalls durch die *ObjectProperties* erfolgen. Für die Modellierung von bidirektionalen Abhängigkeiten, können *ObjectProperties* mit der Eigenschaft *Symmetric* genutzt werden. Dadurch wird ein Graph erstellt, der die Abhängigkeiten der Merkmale repräsentiert. Abbildung 7-8 visualisiert eine beispielhafte Abhängigkeitsmodellierung zwischen Merkmalen in OWL. Im Beispiel sind vier Merkmale aufgeführt, die jeweils als *Individuen* der Klasse *Merkmal* abgebildet sind. Des Weiteren ist in der Abbildung dargestellt, dass *Merkmal1* eine Abhängigkeit zu *Merkmal4* besitzt, die durch das *Object-Property Abhängigkeit* beschrieben wird. Ebenso ist abgebildet, dass *Merkmal2* eine Abhängigkeit zu *Merkmal3* besitzt.

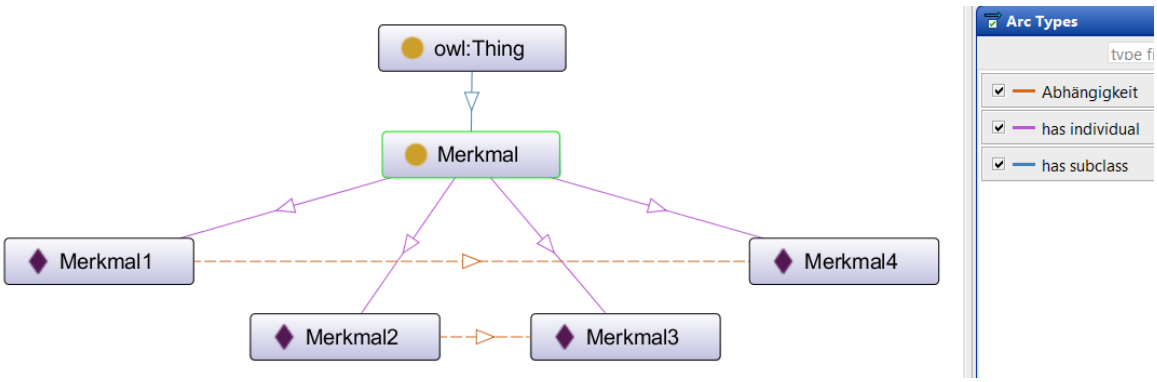

Abbildung 7-8 Modellierungsbeispiel für Abhängigkeiten zwischen Merkmalen in OWL

Der Vorteil von OWL bezüglich der Abhängigkeitsmodellierung ist, dass komplexe Abhängigkeiten abgebildet werden können und die Abhängigkeiten und Merkmale semantisch eindeutig beschrieben

sind. Des Weiteren können für die Abhängigkeitsmodellierung die Reasoning- und Abfragemechanismen sowie die dazugehörigen Werkzeuge von OWL genutzt werden, um Abhängigkeiten abzuleiten bzw. Abhängigkeitsinformationen abzufragen. Ein Nachteil bei der beschriebenen Abhängigkeitsmodellierung ist, dass die Darstellung der Abhängigkeiten und Merkmale speichertechnisch ineffizient ist, aufgrund der großen Expressivität und des hohen Formalisierungsgrades von OWL. Dies trifft insbesondere zu, wenn die zusätzlichen Reasoningmechanismen nicht benötigt werden. Dementsprechend muss bei der Verwendung von OWL für die Abhängigkeitsmodellierung zwischen der benötigten Expressivität sowie dem benötigten Formalisierungsgrad der Modelle und der Speichereffizienz abgewogen werden.

7.3 Auswahl eines geeigneten Beschreibungsmittels

Analog zum Vorgehen aus Kapitel 6 werden in diesem Unterkapitel zunächst verschiedene Bewertungskriterien an ein Beschreibungsmittel für die Darstellung der vorgestellten Abhängigkeitsmodellierung dargelegt. Diese Kriterien werden dabei wieder aus den gestellten Anforderungen der vorliegenden Arbeit, der Fachliteratur und aus der vorgestellten Abhängigkeitsmodellierung selbst abgeleitet. Auf Basis der Kriterien wird anschließend ein geeignetes Beschreibungsmittel für die Abbildung der entwickelten Abhängigkeitsmodellierung ausgewählt.

Identisch mit Unterkapitel 6.3 kann hier ebenfalls auf Basis der Anforderung 5 aus Unterkapitel 2.5 das Bewertungskriterium der Maschineninterpretierbarkeit für das Beschreibungsmittel abgeleitet werden. Ein weiteres Bewertungskriterium, das sich aus der Anforderung 6 aus Unterkapitel 2.5 ableitet, ist die Verknüpfungsmöglichkeit des Beschreibungsmittels mit AML, dem ausgewählten Beschreibungsmittel für das Fähigkeitsmodell. Hierdurch wird die geforderte systematische Verbindung des Fähigkeitsmodells mit dem Abhängigkeitsmodell sichergestellt. Zwei Kriterien, welche ebenfalls für die Bewertung der Beschreibungsmittel in Unterkapitel 6.3 genutzt wurden, sind die Darstellung der PPR-Zusammenhänge und der hohe Grad an Werkzeugunterstützung nach [VDI/VDE 3681]. Erstgenanntes Bewertungskriterium lässt sich aus der beschriebenen Abhängigkeitsmodellierung ableiten, welche Abhängigkeiten zwischen den Objekttypen der FPB beschreibt. Das zweitgenannte Bewertungskriterium soll eine einfache Erstellung und Editierung der Modelle gewährleisten. Letzteres Bewertungskriterium ist die übersichtliche Darstellungsmöglichkeit der Modelle für den Anwender. Durch dieses Kriterium soll sichergestellt werden, dass die Modelle eine möglichst hohe Handhabbarkeit für die Erstellung und Editierung durch einen menschlichen Anwender besitzen [RTC+05].

Das Bewertungsergebnis der vorgestellten Beschreibungsmittel aus Unterkapitel 7.2 bezüglich der erläuterten Kriterien ist in Tabelle 7-2 zusammengefasst. Hierbei ist zu erkennen, dass AML die meisten Kriterien vollständig erfüllt, jedoch im Vergleich zu den anderen Beschreibungsmittel das Kriterium hinsichtlich der übersichtlichen Darstellung nicht erfüllt. Dies resultiert daraus, dass AML ursprünglich nicht für die Beschreibung von Merkmalabhängigkeiten entwickelt wurde und die Modellierung der Abhängigkeiten von Merkmalen in AML äußerst zeitaufwändig ist und schnell unübersichtlich wird. Aufgrund dessen wird AML nicht als Beschreibungsmittel für die Abhängigkeitsmodellierung gewählt. Die verbleibenden Beschreibungsmittel erfüllen alle Kriterien mindestens teilweise. Beispielsweise können die Beschreibungsmittel alle mit dem AML-Modell des Fähigkeitsmodells verknüpft werden, da die Beschreibungsmittel in einem textbasierten Format gespeichert werden können. Da die Verknüpfung der Formate der MDM, des *Zusicherungsdiagramms* und OWL jedoch nicht standardmäßig in AML vorgesehen sind, erfüllen die Beschreibungsmittel dieses Kriterium nur teilweise. Unter den verbleibenden Beschreibungsmitteln erfüllt die MDM die meisten Kriterien vollständig. Aus diesem

Grund wird für die Abbildung des entwickelten Abhängigkeitsmodells die MDM als Beschreibungsmittel gewählt.

Tabelle 7-2 Bewertung der Beschreibungsmittel zur Abbildung des Abhängigkeitsmodellierungskonzepts

	MDM	Zusicherungsdiagram	AML	OWL
Maschineninterpretierbarkeit	●	◑	●	●
Abbildung PPR-Zusammenhänge	◑	◑	●	◑
Hoher Grad an Werkzeugunterstützung	◑	●	◑	◑
Verknüpfbarkeit mit Fähigkeitsmodell	◑	◑	●	◑
Übersichtliche Darstellung	●	◑	○	◑

○ Nicht erfüllt ◑ Teilweise erfüllt ● Vollständig erfüllt

Hierbei ist anzumerken, dass die Unterschiede zwischen der MDM, dem *Zusicherungsdiagramm* und OWL im Kontext dieser Arbeit relativ gering sind und dass das *Zusicherungsdiagramm* sowie OWL Alternativen für die Abhängigkeitsmodellierung darstellen. Unter anderen Umständen hätten diese beiden Beschreibungsmittel auch die geeignetere Wahl für die Abbildung des entwickelten Abhängigkeitsmodells sein können. Beispielsweise wäre das *Zusicherungsdiagramm* vermutlich die geeignetere Wahl, wenn das Fähigkeitsmodell ebenfalls in SysML-Diagrammen abgebildet wäre, da diese Arten von Diagrammen sehr gut miteinander verknüpft werden können. Die Verknüpfung des *Zusicherungsdiagramms* mit AML ist im Vergleich dazu sehr ineffizient. OWL wäre das geeignetste Beschreibungsmittel, wenn beispielsweise auf Basis der Abhängigkeitsmodelle neue Abhängigkeitsinformationen inferiert werden sollen. Da in der vorliegenden Arbeit die genannten Aspekte jedoch nicht relevant sind und der Aspekt hinsichtlich der einfachen und übersichtlichen Darstellung im Vordergrund steht, wurde die MDM gegenüber dem *Zusicherungsdiagramm* und OWL vorgezogen. Darüber hinaus ist die MDM ein weitverbreitetes sowie akzeptiertes Beschreibungsmittel in Zusammenhang mit technischen Änderungen und bietet noch weitere Vorteile hinsichtlich der strukturellen Analyse von Systemen [RTC+05].

7.4 Darstellung der Abhängigkeitsmodellierung

In diesem Unterkapitel wird zunächst die Darstellung der entwickelten Abhängigkeitsmodellierung in der *Multiple-Domain Matrix* vorgestellt. Anschließend wird die Speicherung der vorgestellten MDM-Darstellung im XML-Format erläutert. Das XML-Format wurde in diesem Zusammenhang gewählt, da es ein weitverbreitetes und offenes Format ist und sich gut mit AML verknüpfen lässt. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls die Verknüpfung der AML-Darstellung des Fähigkeitsmodells mit der XML-Darstellung des Abhängigkeitsmodells beschrieben.

Zur Abbildung der vorgestellten Abhängigkeitsmodellierung in der MDM wird für jeden betrachteten Objekttypen eine Domäne erstellt. Hierbei wird bei den Objekttypen Produkt, Information und Energie zwischen Eingangs- und Ausgangsobjekten unterschieden. Dementsprechend kann die MDM bis zu acht Domänen beinhalten, wenn die Objekttypen technische Ressource, Prozess, Produkt, Information und Energie in einem Abhängigkeitsmodell vorhanden sind. Die Notationen der qualitativen Beschreibungen der Korrelations- und Restriktionsbeziehungen innerhalb der MDM sind in Tabelle 7-3 aufgelistet. Hierbei ist zu erkennen, dass positive Korrelationsbeziehungen in der MDM mit einem Pluszeichen und negative Korrelationsbeziehungen mit einem Minuszeichen dargestellt werden. Wechselnde Korrelationsbeziehungen werden hingegen mit einer Null notiert. Für die Notation der Restriktionsbeziehungen werden die dazugehörigen Gleichheits- und Ungleichheitszeichen genutzt. Die Darstellung der quantitativen Beschreibungen der Abhängigkeitsarten erfolgt direkt durch die mathematischen Terme, analog zur quantitativen Darstellung in Unterkapitel 7.1. Die MDM ist so aufgebaut, dass das Merkmal der Zeile von dem Merkmal der Spalte abhängt. Dies bedeutet, dass das Merkmal der Zeile vom Merkmal der Spalte beschränkt wird bzw. mit der Änderung des Merkmals der Spalte korreliert.

Tabelle 7-3 MDM-Notation der qualitativen Abhängigkeitsarten

Abhängigkeitsart	Qualitative Beschreibung	MDM-Notation
Korrelationsbeziehung	Positiv	+
	Negativ	-
	Wechselnd	0
Restriktionsbeziehung	Größer bzw. Größer-gleich	> bzw. >=
	Kleiner bzw. Kleiner-gleich	< bzw. <=
	Gleich	=

Das beschriebene Darstellungskonzept wird anhand der beschriebenen Abhängigkeiten des Bohrstationsbeispiels aus Unterkapitel 7.1 veranschaulicht. Abbildung 7-9 zeigt die MDM-Darstellung der qualitativen Abhängigkeiten aus Abbildung 7-1 einschließlich der Beschreibungslogik. Die abgebildete MDM besitzt drei verschiedene Domänen, die textuell sowie farblich gekennzeichnet sind. Die farbliche Kennzeichnung orientiert sich hierbei an den Farben der FPB für die jeweiligen Objekttypen. Die erste Domäne ist die *Ressourcendomäne* und beinhaltet die Merkmale der Ressource. Merkmale dieser Domäne werden mit dem Präfix *R* sowie durch eine graue Farbe gekennzeichnet. Die zweite Domäne ist die *Prozessdomäne* und umfasst die Prozessmerkmale. Die Merkmale dieser Domäne werden mit dem Präfix *P* versehen und mit einer grünen Farbe gekennzeichnet. Die letzte Domäne in der Abbildung ist die *Ausgangsproduktdomäne,* welche die Merkmale des Ausgangsprodukts beinhaltet. Diese Merkmale werden mit dem Präfix *Prod_O* und einer roten Farbe gekennzeichnet. Da in diesem Beispiel weder Eingangsprodukte noch Objekte vom Typ Energie oder Information vorkommen, besitzt die MDM in der Abbildung lediglich drei Domänen. In Abbildung 7-10 ist zu erkennen, dass die DMM zwischen der *Ressourcendomäne* und der *Produktdomäne* und die dazugehörige gespiegelte DMM nicht genutzt werden, da Abhängigkeiten zwischen diesen Objekttypen im Modellierungskonzept nicht vorgesehen sind. Die abgebildete MDM beinhaltet die gleichen Abhängigkeiten, die ebenfalls in Abbildung 7-1 beschrieben sind. Beispielsweise ist in der MDM dargestellt, dass Merkmal *Prozesszeit* des Prozesses *Bohren* negativ mit dem Prozessmerkmal *Vorschubgeschwindigkeit* korreliert sowie positiv

mit dem Ausgangsproduktmerkmal *Lochtiefe*. Ein Semikolon trennt hierbei die Restriktions- und Korrelationsabhängigkeiten.

MDM: Bohren	R Bohrer:Spannutlänge	R VertikalAntrieb:Geschwindigkeit	P Bohren:Bohrungstiefe	P Bohren:Vorschubgeschwindgkeit	P Bohren:Prozesszeit	Prod_O Ausgangsprodukt:Lochtiefe	Prod_O Ausgangsprodukt:Bearbeitungszeit
R Bohrer:Spannutlänge							
R VertikalAntrieb:Geschwindigkeit							
P Bohren:Bohrungstiefe	<=;+						
P Bohren:Vorschubgeschwindgkeit		=;+					
P Bohren:Prozesszeit				-		+	
Prod_O Ausgangsprodukt:Lochtiefe			+				
Prod_O Ausgangsprodukt:Bearbeitungszeit					+		

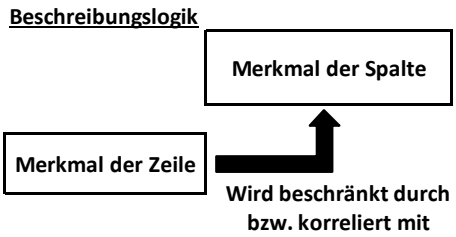

Abbildung 7-9 MDM-Darstellung der Abhängigkeiten der Bohrstation aus Abbildung 7 1

In Abbildung 7-10 werden die quantitativen Abhängigkeiten aus Abbildung 7-2 der Bohrstation in der MDM-Darstellung illustriert. Es ist zu beachten, dass aufgrund der Beschreibungslogik der MDM die mathematischen Ausdrücke der Korrelationsbeziehungen auf die Zeilenmerkmale umgestellt wurden. Zudem ist anzumerken, dass in der MDM für die mathematischen Ausdrücke anstatt des Formelzeichens die Zellenbezeichnung des jeweiligen Zeilenmerkmals verwendet wird. Beispielsweise steht der Ausdruck *A4* in der MDM für das Prozessmerkmal *Bohrungstiefe*, welches sich in der Zelle A4 befindet.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	MDM: Bohren	R Bohrer:Spannutlänge	R VertikalAntrieb:Geschwindigkeit	P Bohren:Bohrungstiefe	P Bohren:Vorschubgeschwindgkeit	P Bohren:Prozesszeit	Prod_O Ausgangsprodukt:Lochtiefe	Prod_O Ausgangsprodukt:Bearbeitungszeit
2	R Bohrer:Spannutlänge							
3	R VertikalAntrieb:Geschwindigkeit							
4	P Bohren:Bohrungstiefe	<=A2; +1*ΔA4						
5	P Bohren:Vorschubgeschwindgkeit		=A3; +1*ΔA5					
6	P Bohren:Prozesszeit				-(A5^2/(60*A7/ΔA6-A5))		+A5*ΔA6/60	
7	Prod_O Ausgangsprodukt:Lochtiefe			+1*ΔA7				
8	Prod_O Ausgangsprodukt:Bearbeitungszeit					+1*ΔA8		

Abbildung 7-10 MDM-Darstellung der Abhängigkeiten der Bohrstation aus Abbildung 7-2

Um eine bessere Maschinenlesbarkeit sowie Anbindung an die AML-Darstellung des Fähigkeitsmodells zu erhalten, wird die MDM in ein XML-Format überführt und gespeichert. Hierfür wurde ein XML-Schema zur Speicherung des beschriebenen MDM-Darstellungskonzepts erstellt. Das Schema orientiert sich an der Standardbeschreibung von Matrizen in XML, in welchem Zeilen und Spalten von Matrizen als verschachtelte XML-Knoten dargestellt werden [MCG03]. Im erstellten XML-Schema werden diese beiden Basisknoten mittels zusätzlicher Knoten gemäß den Domänen der MDM gruppiert, um die strukturellen Informationen der MDM beizubehalten. Dementsprechend besteht das XML-Schema aus einem Stammknoten und vier Knotentypen, die dem Stammknoten direkt untergeordnet sind. Die ersten beiden untergeordneten Knotentypen mit der Bezeichnung *ResourceProperties* und *ProcessProperties* enthalten die Ressourcen- und Prozessmerkmale. Jeder der Knoten besitzt die Attribute *name* und *ID*. Diese beiden Attribute beschreiben den Namen der technischen Ressource oder des Prozesses und die ID des Objekts. Falls bereits eine AML-Darstellung des Fähigkeitsmodells besteht, kann im *ID*-Attribut ebenfalls die ID des korrespondierenden *InternalElements* aus der AML-Datei eingetragen werden. Dies vereinfacht die gemeinsame Auswertung des Fähigkeits- und Abhängigkeitsmodells. Beide Knoten können weitere *ResourceProperties*- oder *ProcessProperties*-Knoten als untergeordnete Knoten enthalten, wenn die technische Ressource oder der Prozess aus weiteren Subkomponenten bzw. –prozessen besteht. Die beiden Knotentypen können *RowProperty*-Knoten enthalten, die die dazugehörigen Merkmale aus den Zeilen der MDM repräsentieren. Die *RowProperty*-Knoten besitzen die drei Attribute *name, ID* und *UID*. Die ersten beiden Attribute beschreiben den Namen des Merkmals und die ID des Merkmals. Das *ID*-Attribut kann auch hier die ID des Attributes aus dem korrespondierenden Fähigkeitsmodell beschreiben, falls vorhanden. Das *UID*-Attribut beschreibt die eindeutige ID des Merkmalknoten, da ein Merkmal im Fähigkeitsmodell für die Beschreibung mehrerer Objekte genutzt werden kann und aufgrund dessen das *ID*-Attribut nicht ausreicht, um die Abhängigkeiten innerhalb der MDM eindeutig zu beschreiben. *RowProperty*-Knoten können *ColumnProperty*-Knoten als untergeordnete Knoten enthalten. Dieser Typ von Knoten repräsentiert die Merkmale aus den MDM-Spalten und beschreibt die Abhängigkeiten des jeweiligen Spaltenmerkmals mit dem Zeilenmerkmal aus dem übergeordneten *RowProperty*-Knoten. *ColumnProperty*-Knoten besitzen ebenfalls die Attribute *name* und *ID*. Zusätzlichen besitzt dieser Knotentyp das Attribute *refUID*, das auf den dazugehörigen *RowProperty*-Knoten verweist. Darüber hinaus verfügt der *ColumnProperty*-Knotentyp über die Attribute *restriction*, *restrictionValue*, *correlation* und *correlationValue*, um die Abhängigkeiten zwischen dem Spalten- und Zeilenmerkmal zu beschreiben. Die beiden anderen Knotentypen, die dem Stammknoten untergeordnet sind, besitzen die Knotennamen *InputProperties* bzw. *OutputProperties* und beinhalten weitere Knoten, die die Merkmale der Eingangs- bzw. Ausgangsobjekte enthalten. Die beinhalteten Knoten können wiederum in die Knotentypen *ProductProperties*, *InformationProperties* und *EnergyProperties* unterteilt werden. Diese drei Knotentypen besitzen dieselben Attribute wie die Knotentypen *ResourceProperties* und *ProcessProperties* und können ebenfalls *RowProperty*-Knoten enthalten, die wiederum untergeordnete *ColumnProperty*-Knoten besitzen. In Abbildung 7-11 ist die XML-Darstellung der MDM aus Abbildung 7-10 visuell zur besseren Veranschaulichung des beschriebenen XML-Schemas dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass im Beispiel keine Eingangsobjekte betrachtet werden und deshalb der Knoten *InputProperties* keine untergeordneten Knoten enthält.

Für die Verknüpfung der AML-Darstellung des Fähigkeitsmodells mit der XML-Darstellung des Abhängigkeitsmodells wird ein eigens definiertes *Interface* mit der Bezeichnung *MDMInterface* genutzt. Das *MDMInterface* besitzt eine *RefBaseClassPath* zur *ExternalDataReference*-Schnittstelle und erbt dementsprechend dessen Attribute. Um die Verknüpfung herzustellen, erhalten *InternalElements* in der AML-Darstellung des Fähigkeitsmodells, die ein Systemobjekt repräsentieren, ein *MDMInterface*, wo der Dateipfad der XML-Darstellung des Abhängigkeitsmodells im Attribut *refURI* des *MDMInterfaces*

angegeben wird. Hierbei kann gemäß des AML-Standards bei der Referenz auf die XML-Datei ebenfalls auf einen einzelnen Knoten verwiesen werden (siehe [AUT18@]), der die Abhängigkeiten des jeweiligen *InternalElements* beinhaltet.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
-<Mdm>
<ResourceProperties name="Bohrer" ID="9d61c2dd-334a-4bbc-8af5-ab95A5b04e30">
        <RowProperty name="Spannutlänge" ID="02-AAA026" UID="A2"/>
</ResourceProperties>
<ResourceProperties name="VertikalAntrieb" ID="9d0132dd-334a-4ztc-8af5-ab95A5b04e30">
        <RowProperty name="Geschwindigkeit" ID="02-AAF750" UID="A3"/>
</ResourceProperties>
<ProcessProperties name="Bohren" ID="36bf66ad-4bA2-49c9-b5e0-b2d605252806">
        <RowProperty name="Bohrungstiefe" ID="02-AAS960" UID="A4">
                <ColumnProperty name="Spannutlänge" ID="02-AAA026" refUID="A2"
                restrictionValue="A2" restriction="<=" correlationValue="1*ΔA4" correlation="+"/>
        </RowProperty>
        <RowProperty name="Vorschubgeschwindigkeit" ID="02-AAF751" UID="A5">
                <ColumnProperty name="Geschwindigkeit" ID="02-AAF750" refUID="A3"
                restrictionValue="A3" restriction="=" correlationValue="1*ΔA5" correlation="+"/>
        </RowProperty>
        <RowProperty name="Prozesszeit" ID="02-AAX657" UID="A6">
                <ColumnProperty name="Vorschubgeschwindigkeit" ID="02-AAF751" refUID="A5"
                restrictionValue="" restriction="" correlationValue="(A5^2/(60*A7/ΔA6-A5))" correlation="-"/>
                <ColumnProperty name="Lochtiefe" ID="02-AAS949" refUID="A7"
                restrictionValue="" restriction="" correlationValue="A5*ΔA6/60" correlation="+"/>
        </RowProperty>
</ProcessProperties>
<InputProperties>
</InputProperties>
<OutputProperties>
        <ProductProperties name="Ausgangsprodukt" ID="ade64A63-c71f-4a41-9e39-6c3f81fdcA6c">
                <RowProperty name="Lochtiefe" ID="02-AAS949" UID="A7">
                        <ColumnProperty name="Bohrungstiefe" ID="02-AAS960" refUID="A4"
                        restrictionValue="" restriction="" correlationValue="1*ΔA7" correlation="+"/>
                </RowProperty>
                <RowProperty name="Bearbeitungszeit" ID="02-AAS941" UID="A8">
                        <ColumnProperty name="Prozesszeit" ID="02-AAX657" refUID="A6"
                        restrictionValue="" restriction="" correlationValue="1*ΔA8" correlation="+"/>
                </RowProperty>
        </ProductPropertiesProperties>
</OutputProperties>
</Mdm>
```

Abbildung 7-11 XML-Darstellung der quantitativen MDM der Bohrstation

8 Methoden für die Ermittlung von Änderungsbedarfen und –möglichkeiten von technischen Änderungen

In diesem Kapitel werden die Anwendung und Analyse der vorgestellten Modelle aus Kapitel 6 und Kapitel 7 erläutert. Hierbei werden die Modelle verwendet, um den technischen Änderungsbedarf eines automatisierten Fertigungssystems zu ermitteln und basierend darauf Änderungsmöglichkeiten zu generieren. Die entwickelte Methode für die Ermittlung des technischen Änderungsbedarfs wird im nachfolgenden Unterkapitel 8.1 ausführlich beschrieben. Anschließend wird im darauffolgenden Unterkapitel 8.2 die Methode zur Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten dargelegt, die die Ergebnisse der Methode für die Änderungsbedarfsermittlung als Eingaben benötigt.

8.1 Methode zur Ermittlung des Bedarfs von technischen Änderungen

In der Methode zur Ermittlung des technischen Änderungsbedarfs wird zwischen zwei Typen von Ursachen unterschieden, die einen Änderungsbedarf auslösen können. Der erste Ursachentyp ist die Fertigung eines neuen bzw. veränderten Produkts. In diesem Fall muss geprüft werden, ob die Fähigkeiten des bestehenden Fertigungssystems geeignet sind, das angeforderte Produkt zu fertigen oder technische Änderungen benötigt werden. Der Fall tritt beispielsweise auf, wenn neue Varianten eines bisherigen Produkts mit dem bestehenden Fertigungssystem gefertigt werden sollen. Der zweite Ursachentyp ist die Kombinationen von Fähigkeiten. Hierbei muss geprüft werden, ob die kombinierten Fähigkeiten miteinander kompatibel sind und dementsprechend deren sequentielle oder parallele Nutzung zulässig ist. Dieser Fall tritt beispielsweise bei der Rekonfiguration von Fertigungsmaschinen auf. Anhand der Änderungsbedarfsanalyse kann geprüft werden, ob die Fähigkeit eines Fertigungssystems eine gestellte Anforderung in der aktuellen Form erfüllen kann oder ob es diesbezüglich Änderungen bedarf. Im Folgenden wird zunächst die Ermittlung des technischen Änderungsbedarfs bei der Änderung von Produktmerkmalausprägungen erläutert. Darauffolgend wird die Änderungsbedarfsermittlung bei der Kombination von Fertigungsfähigkeiten dargelegt.

8.1.1 Methode zur Änderungsbedarfsermittlung bei neuen bzw. veränderten Produkten

Für die Ermittlung des Änderungsbedarfs bei der Fertigung neuer bzw. veränderter Produkte wird eine Beschreibung der Merkmale des geforderten Produkts und deren Ausprägungen benötigt. Diese kann beispielsweise in Form einer Merkmalliste vorliegen. Diese Merkmale können als Anforderungen an das Fertigungssystem aufgefasst werden, die das Fertigungssystem erfüllen muss. Jedoch muss dabei zwischen Merkmalen eines geforderten Zielprodukts und Merkmalen eines zu verwendenden Produkts unterschieden werden. Ein Beispiel für letzteres sind z.B. Rohmaterialien, die von extern vorgegeben sind, um ein Ziel- oder Endprodukt zu fertigen. Merkmale des Zielprodukts beschreiben die Anforderungen an ein Ausgangsprodukt einer Fähigkeit, wohingegen Merkmale des zu verwendenden Produkts Anforderungen an ein Eingangsprodukt einer Fähigkeit darstellen. Bei diesem Ursachentyp erfolgt die Ermittlung des technischen Änderungsbedarfs mittels der Merkmalbeschreibung des geforderten Produkts und dem entwickelten Fähigkeitsmodell. Hinsichtlich der Fähigkeitsbeschreibung des Fertigungssystems sind in diesem Fall lediglich die Beschreibungen der Produktobjekte relevant. Im Folgenden wird zunächst das grundlegende Vorgehen bei der Änderungsbedarfsermittlung beschrieben. Anschließend wird die Änderungsbedarfsermittlung für komponierte Fähigkeiten vorgestellt, die nach dem White-Box-Modellierungsansatz beschrieben werden.

Grundlegendes Vorgehen bei der Änderungsbedarfsermittlung

Das Grundprinzip der Änderungsbedarfsermittlung beinhaltet den Vergleich von Merkmalen und deren Ausprägungen. Hierbei werden die Merkmalbeschreibungen der geforderten Eingangs- und Ausgangsprodukte mit den Beschreibungen der Eingangs- bzw. Ausgangsprodukte des Fähigkeitsmodells abgeglichen. Beim Abgleich wird zunächst geprüft, welche der geforderten Produktmerkmale in der Beschreibung der Eingangs- und Ausgangsprodukte des Fähigkeitsmodells vorhanden sind. Bei den Merkmalen, die sowohl in der Beschreibung des geforderten Produkts als auch im Fähigkeitsmodell vorhanden sind, wird geprüft, ob die geforderten Merkmalausprägungen, die für den Abgleich relevant sind, inklusive derer Einheiten mit den Merkmalausprägungen des Fähigkeitsmodells übereinstimmen. Eine Übereinstimmung liegt vor, wenn die Merkmalausprägung des geforderten Produkts von der Merkmalausprägung des Fähigkeitsmodells vollständig abgedeckt wird. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass die geforderte Merkmalausprägung eine Teilmenge der Merkmalausprägung des Fähigkeitsmodells sein muss. Die detaillierten Abgleichergebnisse und die daraus resultierenden Änderungsbedarfe sind in Tabelle 8-1 aufgelistet.

Wenn alle Merkmale des Eingangsprodukts des Fähigkeitsmodells in den Merkmalen des geforderten Eingangsprodukts vorhanden sind und zudem die Merkmalausprägungen des geforderten Eingangsprodukts eine Teilmenge der Merkmalausprägungen des Eingangsprodukts des Fähigkeitsmodells darstellen, kann geschlussfolgert werden, dass das geforderte Eingangsprodukt von der Fähigkeit verarbeitet werden kann. Dieser Fall wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Übereinstimmung der Merkmale in Zusammenhang mit dem Abgleich von Eingangsprodukten bezeichnet. Im Falle, dass gewisse Merkmale des Eingangsprodukts im Fähigkeitsmodell nicht im geforderten Eingangsprodukt enthalten sind, bedeutet dies, dass keine Aussage über die Verarbeitbarkeit des geforderten Eingangsprodukts gemacht werden kann, da das Eingangsprodukt des Fähigkeitsmodells eine Art Startbedingung repräsentiert (siehe Unterkapitel 6.1.1). In diesem Fall muss die Merkmalbeschreibung des geforderten Eingangsprodukts weiter ausspezifiziert werden, um eine Aussage bezüglich des Änderungsbedarfs treffen zu können. Im Falle, dass geforderte Eingangsproduktmerkmale nicht im Fähigkeitsmodell vorhanden sind, wird keine Änderung benötigt, da diese geforderten Eingangsproduktmerkmale für die Ausführung der Fähigkeit nicht relevant sind. Voraussetzung für diese Schlussfolgerung ist jedoch, dass die Eingangsproduktbeschreibung des Fähigkeitsmodells alle Merkmale, die für die Ausführung der Fähigkeit relevant sind, beinhaltet. Im Falle, dass alle Merkmale des geforderten Eingangsprodukts in der Eingangsproduktbeschreibung des Fähigkeitsmodells vorhanden sind, es jedoch Nichtübereinstimmungen gibt, bedeutet dies, dass das Fertigungssystem eine technische Änderung hinsichtlich seiner Merkmalausprägungen bedarf, um das geforderte Eingangsprodukt verarbeiten zu können. Die Diskrepanzen zwischen den Merkmalausprägungen des geforderten Produkts und den Merkmalausprägungen des Fähigkeitsmodells beschreiben hierbei die Änderungsbedarfe.

Tabelle 8-1 Abgleichergebnisse und Änderungsbedarf bei der Fertigung neuer bzw. veränderter Produkte

Abgleichmerkmale	Abgleichergebnis	Resultierender Änderungsbedarf
Eingangsproduktmerkmale	Alle Eingangsproduktmerkmale des Fähigkeitsmodells sind im geforderten Eingangsprodukt vorhanden und die geforderten Merkmalausprägungen sind eine Teilmenge der Merkmalausprägungen des Eingangsprodukts des Fähigkeitsmodells	Kein Änderungsbedarf: Eingangsprodukt kann verarbeitet werden
	Merkmale des Fähigkeitsmodells im geforderten Eingangsprodukt nicht vorhanden	Keine Änderungsaussage möglich: Beschreibung des geforderten Eingangsprodukts muss weiter ausspezifiziert werden
	Geforderte Eingangsproduktmerkmale nicht im Fähigkeitsmodell vorhanden	Kein Änderungsbedarf: Die geforderten Eingangsproduktmerkmale sind nicht relevant für das Fähigkeitsmodell. Voraussetzung: Eingangsproduktbeschreibung des Fähigkeitsmodells beinhaltet alle relevanten Merkmale.
	Merkmale des Fähigkeitsmodells im geforderten Eingangsprodukt vorhanden, aber Nichtübereinstimmung vorhanden	Technische Änderung bzgl. Merkmalsausprägung notwendig
Ausgangsproduktmerkmale	Alle geforderten Merkmale sind im Ausgangsprodukt des Fähigkeitsmodells vorhanden. Und die geforderten Merkmalausprägungen sind eine Teilmenge der Merkmalausprägungen des Ausgangsprodukts des Fähigkeitsmodells	Kein Änderungsbedarf: Ausgangsprodukt kann gefertigt werden
	Merkmale des Fähigkeitsmodells im geforderten Ausgangsprodukt nicht vorhanden	Kein Änderungsbedarf: Die zusätzlichen Ausgangsproduktmerkmale des Fähigkeitsmodells sind nicht relevant für die Anforderung. Voraussetzung: Merkmalbeschreibung des geforderten Ausgangsprodukts beinhaltet alle relevanten Anfoderungsmerkmale.
	Geforderte Ausgangsproduktmerkmale nicht im Fähigkeitsmodell vorhanden	Technische Änderung notwendig, die über die Änderung der Merkmalsausprägung hinausgeht
	Geforderte Ausgangsproduktmerkmale alle im Fähigkeitsmodell vorhanden, aber Nichtübereinstimmung vorhanden	Technische Änderung bzgl. Merkmalsausprägung notwendig

Wenn alle Merkmale des geforderten Ausgangsprodukts als Ausgangsproduktmerkmale des Fähigkeitsmodells vorhanden sind und die Merkmalausprägungen des geforderten Ausgangsprodukts eine Teilmenge der Merkmalausprägungen des Ausgangsprodukts des Fähigkeitsmodells darstellen, kann das geforderte Ausgangsprodukt von der Fähigkeit gefertigt werden. Dieser Fall wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Übereinstimmung der Merkmale in Zusammenhang mit dem Abgleich von Ausgangsprodukten bezeichnet. Im Falle, dass Ausgangsproduktmerkmale des Fähigkeitsmodells im geforderten Ausgangsprodukt nicht vorhanden sind, wird keine technische Änderung benötigt, da diese zusätzlichen Ausgangsproduktmerkmale für die Anforderung nicht relevant sind. Voraussetzung hierbei ist, dass die Merkmalbeschreibung des geforderten Ausgangsprodukts alle relevanten Anforderungsmerkmale beinhaltet. Im Falle, dass gewisse Merkmale des geforderten Ausgangsprodukts nicht in der Ausgangsproduktbeschreibung des Fähigkeitsmodells enthalten sind, bedeutet dies, dass die vorhandene Fähigkeit das geforderte Ausgangsprodukt nicht fertigen kann, da die Fähigkeit die geforderten Merkmale nicht mit dem Prozess herstellen kann. Voraussetzung dieser Schlussfolgerung ist, dass die Beschreibung des Ausgangsprodukts im Fähigkeitsmodell vollständig ist. In diesem Fall benötigt das zugehörige technische System technische Änderungen, die über die Änderung der Merkmalausprägungen hinausgehen, um das geforderte Ausgangsprodukt zu fertigen, da neue Merkmale zum Ausgangsprodukt des Fähigkeitsmodells hinzugefügt werden müssen. Im Falle, dass alle Merkmale des geforderten Ausgangsprodukts in der Ausgangsproduktbeschreibung des Fähigkeitsmodells enthalten sind, es jedoch Nichtübereinstimmungen gibt, bedeutet dies, dass das Fertigungssystem eine technische Änderung hinsichtlich seiner Merkmalausprägungen benötigt, um das geforderte Ausgangsprodukt fertigen zu können. Die Diskrepanzen zwischen den Merkmalausprägungen des geforderten Ausgangsprodukts und den Merkmalausprägungen des Fähigkeitsmodells beschreiben hierbei ebenfalls Änderungsbedarfe.

Abbildung 8-1 stellt das beschriebene Grundprinzip der Änderungsbedarfsermittlung beispielhaft anhand der beschriebenen Bohrstation dar. In dem Beispiel soll ein Eingangsprodukt verarbeitet werden, das eine Breite von 20 Millimeter sowie eine Zugfestigkeit von 350 Newton pro Quadratmillimeter besitzt. Mit diesem Eingangsprodukt soll ein Ausgangsprodukt gefertigt werden, welches die Merkmale *Lochtiefe* und *Lochdurchmesser* mit den Ausprägungen 25 und 8 Millimeter besitzt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Bohrstation ein Eingangsprodukt mit einer Zugfestigkeit zwischen 200 und 500 Newton pro Quadratmillimeter verarbeiten kann. Dementsprechend gibt es eine Übereinstimmung zwischen dem geforderten Eingangsprodukt und dem Eingangsprodukt des Fähigkeitsmodells, da die Ausprägung der Zugfestigkeit des geforderten Eingangsprodukts von dem Eingangsprodukt des Fähigkeitsmodells abgedeckt wird und das Merkmal *Breite* des geforderten Eingangsprodukts nicht für die Fähigkeit der Bohrstation relevant ist. In der Abbildung ist zudem zu erkennen, dass das Ausgangsprodukt des Fähigkeitsmodells die Merkmale *Lochtiefe, Lochdurchmesser* und *Bearbeitungszeit* besitzt. Erstgenanntes Merkmal besitzt dabei die Ausprägung 0 bis 20 Millimeter. Zweitgenanntes Merkmal besitzt die Ausprägung 8 Millimeter. Dementsprechend gibt es keine Übereinstimmung zwischen dem geforderten Ausgangsprodukt und dem Fähigkeitsmodell, da die Fähigkeit der Bohrstation lediglich den geforderten Durchmesser des Loches abgedeckt und kein Produkt mit der geforderten *Lochtiefe* herstellen kann. Folglich muss die Fähigkeit der Bohrstation geändert werden, um das geforderte Produkt herstellen zu können. Der Änderungsbedarf ist hierbei die Erhöhung der Obergrenze der Merkmalausprägung *Lochtiefe* um mindestens 5 Millimeter.

Das beschriebene Vorgehen für die Ermittlung des Änderungsbedarfs kann bei einfachen Fähigkeiten sowie bei komponierten Fähigkeiten, die nach dem Black-Box-Modellierungsansatz (siehe Unterkapitel 6.1.2) beschrieben wurden, genutzt werden.

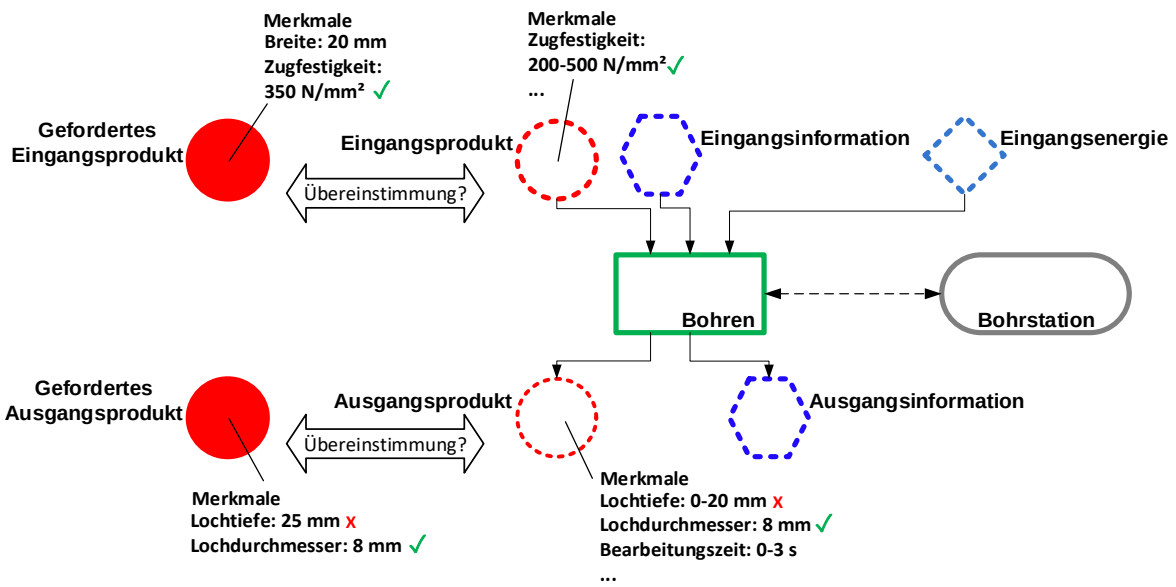

Abbildung 8-1 Schematische Darstellung des Grundprinzips der Änderungsbedarfsermittlung bei der Fertigung neuer bzw. veränderter Produkte am Beispiel der Bohrstation

Änderungsbedarfsermittlung für Fähigkeiten bei einer White-Box-Modellierung

Für komponierte Fähigkeiten, die nach dem White-Box-Modellierungsansatz beschrieben werden, reicht das oben beschriebene Vorgehen nicht aus. Aufgrund der erläuterten Charakteristika des White-Box-Modellierungsansatzes (siehe Unterkapitel 6.1.2) muss die Dekompositionsbeschreibung der komponierten Fähigkeit für die Änderungsbedarfsermittlung analysiert werden. Hierbei muss die Merkmalbeschreibung eines geforderten Eingangsprodukts mit jedem Produkt der Dekompositionsbeschreibung, das ein Eingangsprodukt einer Teilfähigkeit darstellt, abgeglichen werden. Die Merkmalbeschreibung eines geforderten Ausgangsprodukts muss hingegen mit jedem Produkt der Dekompositionsbeschreibung abgeglichen werden, welches ein Ausgangsprodukt einer Teilfähigkeit repräsentiert. Analog zu dem vorherigen Vorgehen wird bei jedem Abgleich überprüft, ob die Merkmale der Produktbeschreibungen miteinander übereinstimmen. Im Unterschied zum vorherigen Vorgehen ist bei diesem Vorgehen die Reihenfolge des Abgleichs von großer Wichtigkeit. Der Abgleich der Merkmale des geforderten Eingangsprodukts mit den Merkmalen der Eingangsprodukte aus der Dekompositionsbeschreibung muss mit dem ersten Eingangsprodukt beginnen. Anschließend müssen der Reihenfolge nach alle nachfolgenden Eingangsprodukte und deren Merkmale mit den geforderten Merkmalen des Eingangsprodukts abgeglichen werden. Hierbei müssen Merkmale, bei denen bereits eine Übereinstimmung ermittelt wurde, im Zuge der nachfolgenden Abgleichungen nicht mehr berücksichtigt werden, auch wenn das Merkmal in einer nachfolgenden Eingangsproduktbeschreibung enthalten ist. Grund hierfür ist, dass angenommen wird, dass, wenn ein gefordertes Produktmerkmal von einer Teilfähigkeit bereits bearbeitet werden kann, diese Teilfähigkeit das Produktmerkmal so verändert, dass es für die nachfolgenden Teilfähigkeiten ebenfalls bearbeitbar ist. Diese Annahme ist nur gültig, sofern die Kompatibilität der Teilfähigkeiten innerhalb der komponierten Fähigkeit sichergestellt ist. Mit Kompatibilität ist hierbei gemeint, dass die Ausgangsobjekte der vorgelagerten Teilfähigkeiten von der nachfolgenden Teilfähigkeit als Eingangsobjekte verwendet werden können. Merkmale, bei denen zunächst keine Übereinstimmung ermittelt werden konnte, werden in den nachfolgenden Abgleichen weiterhin berücksichtigt, wodurch mehrere Änderungsbedarfe ermittelt werden können. Jedoch ist hierbei zu erwähnen, dass es in diesem Fall sinnvoll ist, die Änderungsbedarfe der Ermittlungsreihen-

folge nach zu bearbeiten, da es aufgrund von sequentiellen Abläufen der Teilfähigkeiten (siehe Unterkapitel 6.1.2) dazu führen kann, dass aufgrund dessen später ermittelte Änderungsbedarfe dadurch ebenfalls behoben werden. Der Abgleich der Merkmale des geforderten Ausgangsprodukts mit den Merkmalen der Ausgangsprodukte aus der Dekompositionsbeschreibung läuft in umgekehrter Reihenfolge zu den Eingangsprodukten ab. Dies bedeutet, dass der Abgleich mit dem letzten Ausgangsprodukt beginnt und mit dem ersten Ausgangsprodukt endet. Hier gilt ebenfalls, dass Merkmale, bei denen bereits eine Übereinstimmung ermittelt wurde, im Zuge der nachfolgenden Abgleiche nicht mehr berücksichtigt werden. Merkmale, bei denen zunächst keine Übereinstimmung ermittelt werden konnte, werden auch beim Abgleich der Ausgangsprodukte in den nachfolgenden Abgleichen weiterhin berücksichtigt, wodurch mehrere Änderungsbedarfe ermittelt werden können. Die Abgleichergebnisse und die daraus resultierenden Ermittlungsergebnisse sind hierbei identisch mit denen aus Tabelle 8-1.

Das beschriebene Vorgehen für die Änderungsbedarfsermittlung für komponierte Fähigkeiten, die nach dem White-Box-Ansatz beschrieben wurden, wird anhand des Bohrmodulbeispiels veranschaulicht. In Abbildung 8-2 wird beispielhaft für das vorgestellte Bohrmodul die Änderungsbedarfsermittlung für komponierte Fähigkeiten, die nach dem White-Box-Modellierungsansatz beschrieben werden, schematisch dargestellt. Für eine bessere Übersichtlichkeit illustriert die Abbildung lediglich die Dekompositionsbeschreibung des Fähigkeitsmodells mit Produktobjekten. Im Beispiel wird ein Eingangsprodukt gefordert, das eine Breite von 20 Millimeter, ein Gewicht von 2 Kilogramm, eine Zugfestigkeit von 350 Newton pro Quadratmillimeter besitzt und sich hinsichtlich seiner x-Position im Koordinatenursprung befindet. In der Abbildung ist erkennbar, dass die Merkmale des geforderten Eingangsprodukts mit den Merkmalen der Produkte *Eingangsmaterial* und *Zwischenprodukt* abgeglichen werden, da ersteres das Eingangsprodukt der Transportfähigkeit und letzteres das Eingangsprodukt der Bohrfähigkeit darstellt. In der Abbildung ist erkennbar, dass im ersten Abgleich mit dem Produkt *Eingangsmaterial* eine Übereinstimmung bezüglich der Breite, dem Gewicht sowie der x-Position des geforderten Eingangsprodukts ermittelt wurde. Die Zugfestigkeit des Produkts ist nicht relevant für die Ausführung der Transportfähigkeit. Beim zweiten Abgleich des geforderten Eingangsprodukts mit dem Produkt *Zwischenprodukt* wird eine Übereinstimmung des Merkmals *Zugfestigkeit* ermittelt. Die Merkmale *Breite* und *xPosition* werden nicht im Abgleich berücksichtigt, da für diese beiden Merkmale bereits im ersten Abgleich eine Übereinstimmung ermittelt wurde. Im Falle eines Abgleichs des Merkmals *xPosition* würde eine Nichtübereinstimmung als Resultat ermittelt werden, da das Produkt *Zwischenprodukt* die Ausprägung 15 Zentimeter besitzt. Jedoch ist dies hierbei nicht relevant, da die Transportfähigkeit die x-Position des ursprünglichen Eingangsprodukts, das die geforderte Ausprägung des Merkmals *xPosition* erfüllt, verändert und die nachfolgende Bohrfähigkeit das geänderte Produkt verarbeiten kann. Dementsprechend kann das geforderte Eingangsprodukt vom Bohrmodul verarbeitet werden. In Abbildung 8-2 ist des Weiteren zu erkennen, dass ein Ausgangsprodukt gefordert ist, das die Merkmale *Lochtiefe* und *Lochdurchmesser* mit jeweils der Ausprägung 25 Millimeter und 8 Millimeter besitzt. Die Merkmale des geforderten Ausgangsprodukts werden zunächst mit den Merkmalen des Produkts *Ausgangsprodukt* abgeglichen, da dies das letzte Ausgangsprodukt in der Dekompositionsbeschreibung ist. Anschließend werden die Merkmale des geforderten Ausgangsprodukts noch mit den Merkmalen des Produkts *Zwischenprodukt* abgeglichen, da dies das Ausgangsprodukt der Transportfähigkeit ist. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass im ersten Abgleich eine Nichtübereinstimmung bezüglich des Merkmals *Lochtiefe* vorliegt. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass im zweiten Abgleich die beiden Merkmale des geforderten Ausgangsprodukts nicht im Produkt *Zwischenprodukt* vorhanden sind, woraus geschlussfolgert werden kann, dass die Transportfähigkeit das geforderte Ausgangsprodukt nicht fertigen kann. Folglich kann das Bohrmodul das geforderte Ausgangsprodukt nicht

fertigen und benötigt eine technische Änderung bezüglich des Merkmals *Lochtiefe* der Teilfähigkeit *Bohren*. Der Änderungsbedarf ist hierbei die Erhöhung der Obergrenze der Merkmalausprägung um mindestens 5 Millimeter.

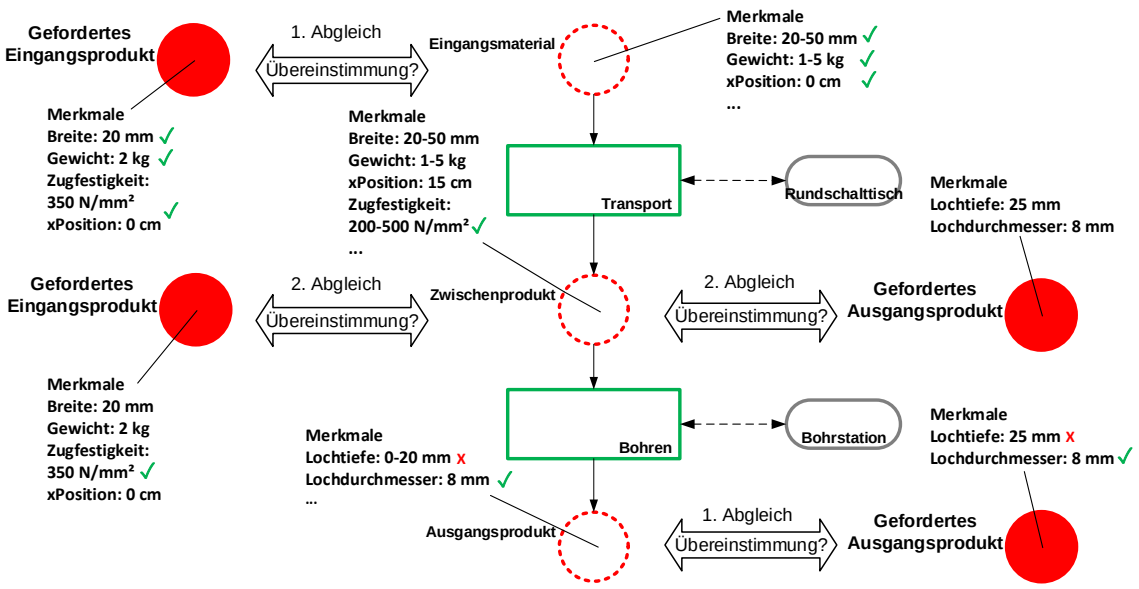

Abbildung 8-2 Schematische Darstellung des Vorgehens der Änderungsbedarfsermittlung bei einer White-Box-Modellierung am Beispiel des Bohrmoduls

8.1.2 Methode zur Änderungsbedarfsermittlung bei der Kombination von Fähigkeiten

Für die Ermittlung des Änderungsbedarfs bei der Kombination von Fertigungsfähigkeiten werden die jeweiligen Fähigkeitsmodelle benötigt, die miteinander kombiniert werden sollen. Bei der Änderungsbedarfsermittlung wird hierbei unterschieden zwischen einer sequentiellen und parallelen Kombination von Fertigungsfähigkeiten. Im Folgenden wird zunächst die Änderungsbedarfsermittlung bei der sequentiellen Kombination von Fertigungsfähigkeiten erläutert und anschließend die Änderungsbedarfsermittlung bei der parallelen Kombination.

Änderungsbedarfsermittlung bei der sequentiellen Kombination von Fertigungsfähigkeiten

Bei einer sequentiellen Fähigkeitskombination wird bei der Änderungsbedarfsermittlung geprüft, ob die Ausgangsobjekte der vorgelagerten Fähigkeit von der nachgelagerten Fähigkeit verarbeitet werden kann. Dies erfolgt dabei durch einen Abgleich der Ausgangsobjekte der vorgelagerten Fähigkeit mit den Eingangsobjekten der nachgelagerten Fähigkeiten. Das Abgleichvorgehen ist ähnlich dem beschriebenen Vorgehen in Unterkapitel 8.1.1 mit dem Unterschied, dass hierbei alle Ausgangs- und Eingangsobjekttypen miteinander abgeglichen werden, d.h. Produkt-, Energie- und Informationsobjekte. Dabei ist zu beachten, dass nur Objekte des gleichen Typs miteinander abgeglichen werden. Ein weiterer Unterschied ist hierbei, dass eine Übereinstimmung vorhanden ist, wenn eine Schnittmenge zwischen den Merkmalausprägungen des Ausgangs- und Eingangsobjekts ermittelt werden kann. Im Vorgehen von Unterkapitel 8.1.1 wurde hingegen für eine Übereinstimmung verlangt, dass die Merkmalausprägung des geforderten Objekts von der Merkmalausprägung des Fähigkeitsmodells vollständig abgedeckt wird. Die möglichen Abgleichergebnisse sowie die daraus resultierenden Änderungsbedarfe sind in Tabelle 8-2 aufgelistet. Wie in der Tabelle zu erkennen, ist im Falle einer Übereinstimmung aller

Merkmale der Eingangsobjekte kein Änderungsbedarf notwendig, da in diesem Fall die Ausgangsobjekte von der nachgelagerten Fähigkeit verarbeitet werden können. Im Falle, dass Merkmale der Eingangsobjekte nicht in der Ausgangsobjektbeschreibung vorhanden sind, können zwei Änderungsmöglichkeiten geschlussfolgert werden. Erste Änderungsmöglichkeit ist eine technische Änderung der vorgelagerten Fähigkeit, die über die Änderung der Merkmalausprägung hinausgeht, da neue Merkmale zu den Ausgangsobjekten hinzugefügt werden müssen. Die zweite Änderungsmöglichkeit ist, dass die vorgelagerte Fähigkeit mit anderen Fähigkeiten kombiniert wird, um eine Übereinstimmung mit den fehlenden Merkmalen der Eingangsobjekte zu erreichen. Die Vorrausetzung für diese Schlussfolgerung ist, dass die Ausgangsobjektbeschreibung vollständig ist. Im Falle, dass Merkmale der Ausgangsobjekte in der Beschreibung der Eingangsobjekte nicht vorhanden sind, kann geschlussfolgert werden, dass kein Änderungsbedarf notwendig ist, da die fehlenden Ausgangsobjektmerkmale nicht relevant für die Ausführung der nachgelagerten Fähigkeit sind. Voraussetzung hierbei ist, dass die Eingangsproduktbeschreibung des Fähigkeitsmodells alle relevanten Merkmale beinhaltet. Des Weiteren ist der Tabelle zu entnehmen, dass, wenn alle Merkmale der Eingangsobjekte in der Ausgangsobjektbeschreibung vorhanden sind, es jedoch Nichtübereinstimmungen gibt, eine technische Änderung bezüglich der Merkmalausprägungen benötigt wird. Die technische Änderung kann dabei sowohl an der vorgelagerten Fähigkeit als auch an der nachgelagerten Fähigkeit stattfinden. Die Diskrepanzen zwischen den Merkmalausprägungen des Ausgangs- und Eingangsobjekts beschreiben hierbei die Änderungsbedarfe.

Tabelle 8-2 Übersicht Abgleichergebnisse und resultierender Änderungsbedarf bei der Kombination von Fertigungsfähigkeiten

Abgleichergebnis	Resultierender Änderungsbedarf
Übereinstimmung aller vorhandenen Merkmale der Eingangsobjekte	Kein Änderungsbedarf: Ausgangsobjekte können von der nachgelagerten Fähigkeit verarbeitet werden
Merkmale der Eingangsobjekte in der Beschreibung der Ausgangsobjekte nicht vorhanden	Technische Änderung für vorgelagerte Fähigkeit notwendig, die über die Änderung der Merkmalsausprägung hinausgeht, oder Kombination mit weiteren Fähigkeiten
Merkmale der Ausgangsobjekte in der Beschreibung der Eingangsobjekte nicht vorhanden	Kein Änderungsbedarf: Fehlende Ausgangsobjektmerkmale sind nicht relevant für die nachgelagerte Fähigkeit.
Alle Merkmale der Eingangsobjekte in der Beschreibung der Ausgangsobjekte vorhanden, aber Nichtübereinstimmung vorhanden	Technische Änderung bzgl. Merkmalsausprägung notwendig an der vorgelagerten und/oder nachgelagerten Fähigkeit

Abbildung 8-3 veranschaulicht die beschriebene Änderungsbedarfsermittlung bei der sequentiellen Kombination von Fähigkeiten anhand des Beispiels der Transport- und Bohrfähigkeit. Im Beispiel wird geprüft, ob die Transportfähigkeit und die Bohrfähigkeit sequentiell miteinander kombinierbar sind oder es dafür technischer Änderungen bedarf. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Produkte *TransportiertesProdukt* und *Eingangsprodukt* miteinander abgeglichen werden, da Ersteres das Ausgangsobjekt der vorgelagerten Fähigkeit und Letzteres das Eingangsobjekt der nachgelagerten Fähigkeit ist. Aus dem gleichen Grund werden ebenfalls die Informationsobjekte *Fertigsignal* und *Eingangsinformation* miteinander abgeglichen. Ein Ergebnis der Abgleiche ist, dass die Bohrfähigkeit das Ausgangsprodukt der Transportfähigkeit verarbeiten kann, da beide Produktobjektbeschreibungen die

gleiche Ausprägung hinsichtlich der Zugfestigkeit besitzen. Ein weiteres Ergebnis ist, dass das ausgegebene Informationsobjekt der Transportfähigkeit ebenfalls von der Bohrfähigkeit verarbeitet werden kann, da die beiden Merkmalausprägungen des Merkmals *BinäresSignalVorhanden* die gemeinsame Schnittmenge *True* besitzen. Technisch gesehen bedeutet dieses Abgleichergebnis, dass bei der Kombination das Ausgangssignal des Transportprozesses gleichzeitig das Startsignal des Bohrprozesses werden kann. In der Abbildung ist darüber hinaus zu erkennen, dass das Energieobjekt *Eingangsenergie* der Bohrfähigkeit mit keinem Ausgangsobjekt abgeglichen werden kann, da die Transportfähigkeit kein Ausgangsobjekt vom Typ Energie besitzt. Dementsprechend kann im Beispiel geschlussfolgert werden, dass die Transportfähigkeit mit der Bohrfähigkeit sequentiell kombinierbar ist, wenn die Transportfähigkeit entweder eine Energie als Ausgangsobjekt bereitstellt, die eine Spannung zwischen 220 und 240 Volt besitzt, oder eine weitere Fähigkeit hinzugefügt wird, die die von der Bohrfähigkeit benötigte Eingangsenergie bereitstellt, oder wenn die Eingangsenergie für den Bohrprozess an der Bilanzgrenze des komponierten Systems, quasi von „außerhalb“, bereitgestellt wird.

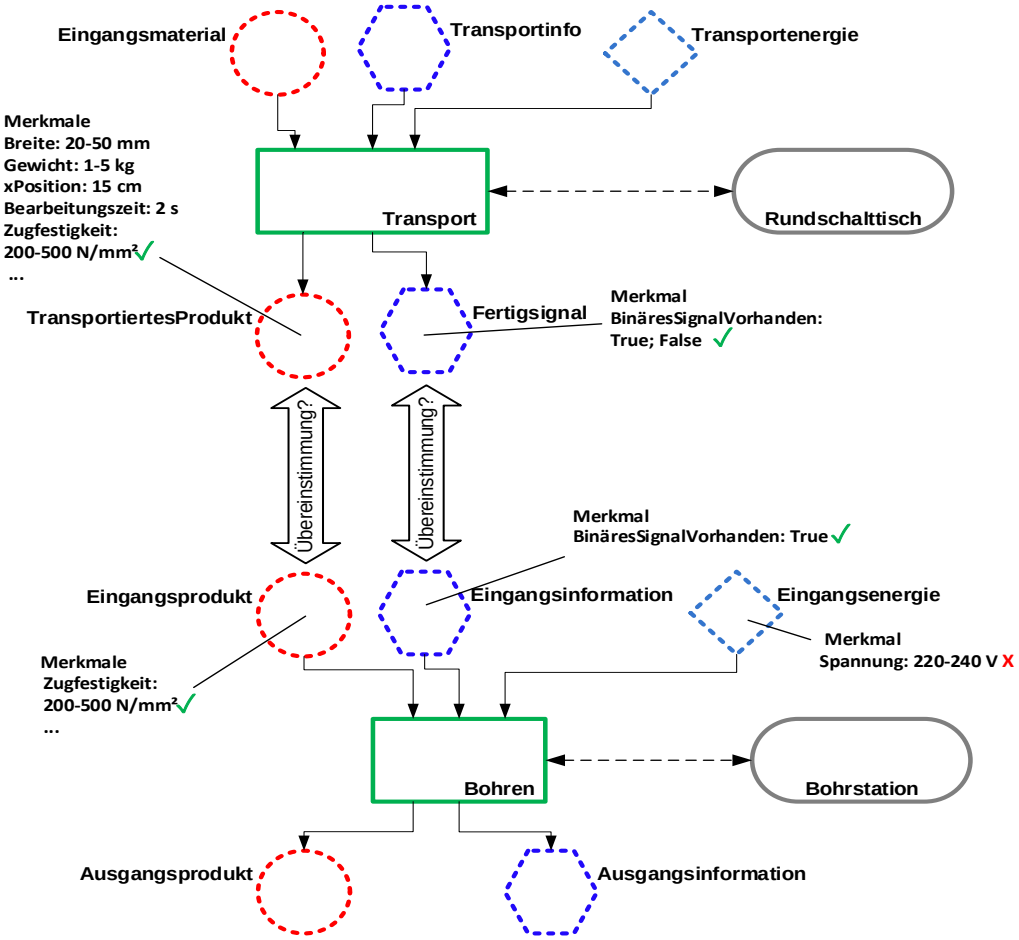

Abbildung 8-3 Schematische Darstellung der Änderungsbedarfsermittlung bei der sequentiellen Kombination von Fähigkeiten

Änderungsbedarfsermittlung bei der parallelen Kombination von Fertigungsfähigkeiten

Bei einer parallelen Fähigkeitskombination wird bei der Änderungsbedarfsermittlung geprüft, welche Eingangsobjekte der Fähigkeitsmodelle parallel von beiden Fähigkeiten verarbeitet werden. Diese Eingangsobjekte müssen miteinander abgeglichen werden. Im Abgleichverfahren werden ebenfalls Übereinstimmungen der Objektmerkmale und deren Ausprägungen analysiert. Wie bei der sequentiellen Kombination ist hierbei eine Übereinstimmung vorhanden, wenn eine Schnittmenge zwischen den

Merkmalausprägungen der Eingangsobjekte ermittelt werden kann. Wenn beim Abgleich keine Nichtübereinstimmungen ermittelt werden, bedeutet dies, dass die beiden Fähigkeiten parallel miteinander kombinierbar sind, da beide Fähigkeiten das gleiche Eingangsobjekt zeitgleich bearbeiten können. Es ist zu beachten, dass dies auch der Fall ist, wenn die abgeglichenen Eingangsobjekte vollständig disjunkte Merkmale besitzen. Im gegenteiligen Fall kann geschlussfolgert werden, dass entweder einer der beiden Fähigkeiten oder beide Fähigkeiten eine technische Änderung bezüglicher ihrer Merkmalausprägung benötigen, um die Fähigkeiten parallel ausführen zu können. Die Diskrepanzen zwischen den Merkmalausprägungen der Eingangsobjekte, die nicht miteinander übereinstimmen, beschreiben hierbei die Änderungsbedarfe.

In Abbildung 8-4 wird beispielhaft die parallele Kombination der Transport- und Bohrfähigkeit dargestellt. Da beide Fähigkeiten bei der parallelen Ausführung dasselbe Eingangsprodukt bearbeiten sollen, muss ein Abgleich zwischen diesen beiden Produkten stattfinden. Das Resultat des Abgleichs ist, dass die Merkmale, die in beiden Eingangsproduktbeschreibungen vorhanden sind, miteinander übereinstimmen. Hierbei ist zu erkennen, dass beide Eingangsproduktbeschreibungen das Merkmal *Zugfestigkeit* mit der gleichen Ausprägung besitzen sowie das Merkmal *Breite* mit einer Übereinstimmung bei der Ausprägung 20 bis 30 Millimeter. Ebenfalls ist zu erkennen, dass in diesem Beispiel das Eingangsprodukt der Bohrfähigkeit das Merkmal *xPosition* besitzt und dieses mit dem Merkmal *xPosition* des Produkts *Eingangsmaterial* übereinstimmt. Hierbei ist zu beachten, dass von einem globalen Koordinatensystem für die Beschreibung der Merkmale ausgegangen wird. Auf Basis der im Beispiel verwendeten Fähigkeitsmodelle kann dementsprechend ermittelt werden, dass diese beiden Fähigkeiten in paralleler Ausführung miteinander kombiniert werden können, ohne technischen Änderungsbedarf.

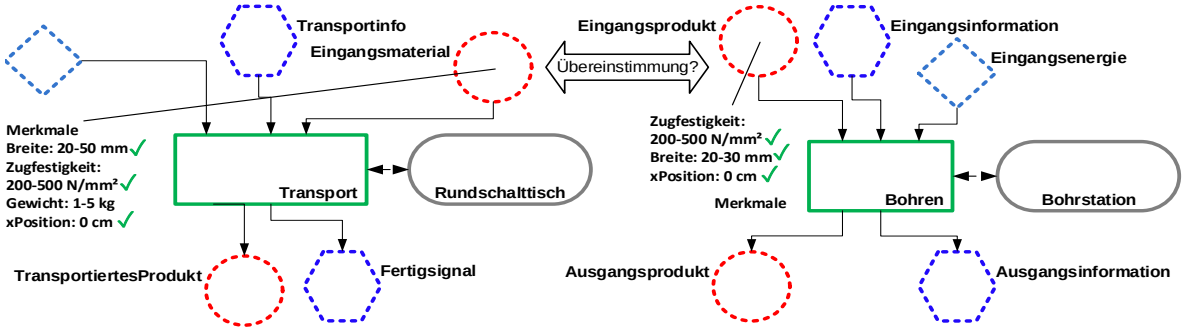

Abbildung 8-4 Schematische Darstellung der Änderungsbedarfsermittlung bei der parallelen Kombination von Fähigkeiten

Abschließend ist anzumerken, dass hinsichtlich der Änderungsbedarfsermittlung bei der Kombination von Fertigungsfähigkeiten das vorgestellte Vorgehen lediglich Änderungsbedarfe ermittelt, die ihren Ursprung in den Eingangs- oder Ausgangsobjektbeschreibung der Fähigkeiten haben. Änderungsbedarfe, die aufgrund von Abhängigkeiten entstehen, die aus der Kombination der technischen Prozesse und technischen Ressourcen resultieren, werden mit dem vorgestellten Vorgehen nicht abgedeckt.

8.2 Methode zur Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten

Die entwickelte Methode für die Generierung von technischen Änderungsmöglichkeiten verwendet als Input die ermittelten Änderungsbedarfe aus Unterkapitel 8.1 hinsichtlich notwendiger Änderungen von Merkmalausprägungen der Fertigungsfähigkeiten. Im weiteren Verlauf des Unterkapitels werden

diese Änderungsbedarfe auch als Initialänderungsbedarfe bezeichnet. Aufgrund des Fokus der vorliegenden Arbeit werden die Änderungsbedarfe, die über reine Merkmaländerungen hinausgehen, hierbei nicht weiter adressiert. Die entwickelte Methode besteht im Wesentlichen aus drei Teilen. Im ersten Teil wird anhand der Initialänderungsbedarfe und den aus Kapitel 7 vorgestellten Abhängigkeitsmodellen eine Änderungsauswirkungsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse der Änderungsauswirkungsanalyse werden im zweiten Teil als Baumgraphen dargestellt. Im dritten Teil der Methode werden anhand der Baumgraphen verschiedene Änderungsmöglichkeiten ermittelt. Die drei Teile der Methode werden im Folgenden detaillierter erläutert. Abschließend wird die Methode anhand eines Beispiels veranschaulicht.

Änderungsauswirkungsanalyse

Die Änderungsauswirkungsanalyse kann qualitativ oder quantitativ durchgeführt werden, je nachdem ob die Abhängigkeitsmodelle qualitativ oder quantitativ beschrieben sind. Bei der qualitativen Durchführung der Änderungsauswirkungsanalyse wird die *Änderungsrichtung* der Merkmalausprägung betrachtet. Hierbei kann die *Änderungsrichtung* entweder eine Erhöhung, eine Verringerung oder eine richtungslose Änderung der Merkmalausprägung beschreiben. Merkmalausprägungen, die durch eine Ordinal-, Intervall- oder Verhältnisskala beschrieben werden, können eine Erhöhung oder Verringerung als *Änderungsrichtung* besitzen. Bei Änderungen von Merkmalausprägungen, die durch eine Nominalskala beschrieben werden, wird die *Änderungsrichtung* als richtungslos beschrieben. Abbildung 8-5 illustriert schematisch den Ablauf der Änderungsauswirkungsanalyse als Flussdiagramm.

In der Änderungsauswirkungsanalyse wird zunächst analysiert, welche direkten Implikationen die Initialänderungsbedarfe auf das Fertigungssystem und dessen Fähigkeiten besitzen. Diese direkte Implikationsanalyse erfolgt durch eine Untersuchung der Zeile und Spalte des Abhängigkeitsmodells, welche die Abhängigkeiten des sich zu ändernden Merkmals beschreiben. Die Zeilenuntersuchung läuft wie folgt ab:

Z1) Ermittlung von Spaltenmerkmalen, die eine Korrelationsbeziehung zum zu ändernden Zeilenmerkmal besitzen.
Z2) Bestimmung der benötigten Änderungsausprägungen der korrelierenden Spaltenmerkmale anhand der Korrelationsbeziehungen mit dem Zeilenmerkmal, um die geforderte Änderung des Zeilenmerkmals zu erreichen.
Z3) Ermittlung von Spaltenmerkmalen, die eine relevante Restriktionsbeziehung für die geforderte Änderungsausprägung des Zeilenmerkmals besitzen.
Z4) Bestimmung der benötigten Änderungsausprägung des beschränkenden Spaltenmerkmals, um eine zulässige Änderung des zu ändernden Zeilenmerkmals zu erreichen.

Es ist zu beachten, dass bei einer qualitativen Änderungsauswirkungsanalyse die Korrelationsbeziehung wechselnd in den Punkten Z2) und Z4) dazu führt, dass die Änderungsausprägung des Spaltenmerkmals als richtungslos angegeben wird, da die Änderungsrichtung des Spaltenmerkmals auf Basis der Korrelationsbeziehung in diesem Fall nicht näher bestimmt werden kann. Bei der Korrelationsbeziehung wechselnd könnte eine Erhöhung oder eine Verringerung der Spaltenmerkmalausprägung erfolgen, was jedoch nur bei einer quantitativen Betrachtung bestimmt werden kann. Daher wird die Änderungsrichtung des Spaltenmerkmals in diesem Fall als wechselnd angegeben. Aus diesem Grund ist bei einer qualitativen Änderungsauswirkungsanalyse auch zu beachten, dass, wenn das Zeilenmerkmal die Änderungsausprägung richtungslos besitzt, alle Restriktionsbeziehungen in Punkt Z3) als relevant betrachtet werden, um alle möglichen direkten Implikationen zu bestimmen.

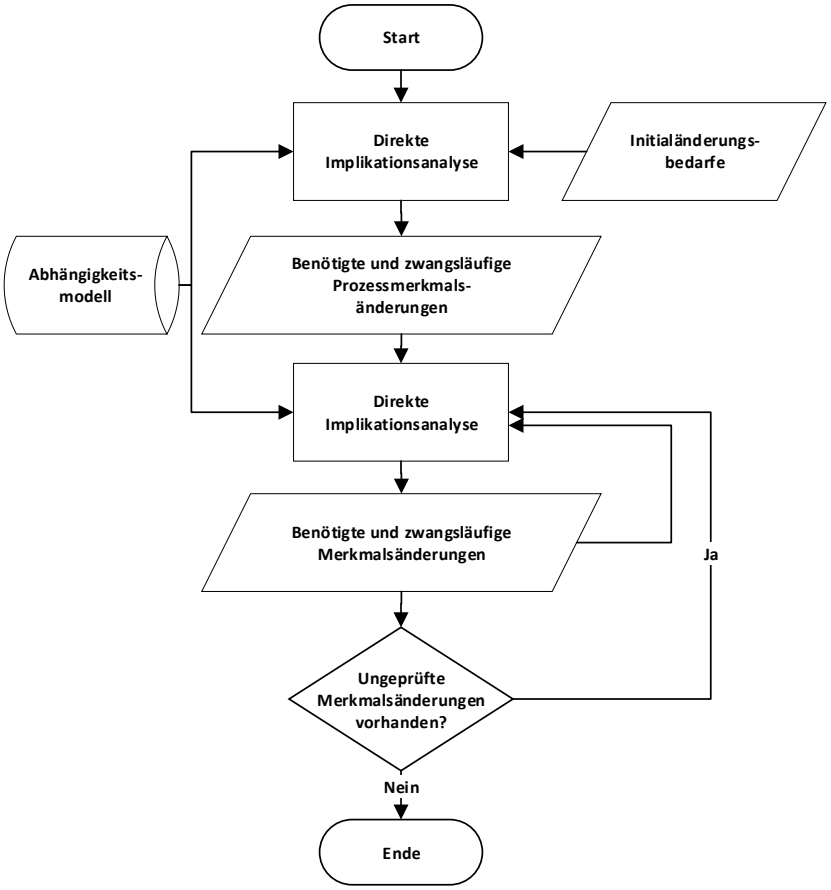

Abbildung 8-5 Schematischer Ablauf der Änderungsauswirkungsanalyse

Die ermittelten Merkmaländerungen aus der Zeilenuntersuchung repräsentieren aufgrund der Beschreibungslogik des Abhängigkeitsmodells hierbei benötigte Merkmaländerungen, die es ermöglichen bzw. dazu führen, dass die geforderte Merkmaländerung erreicht wird und zulässig ist. Die Spaltenuntersuchung läuft analog zur Zeilenuntersuchung wie folgt ab:

S1) Ermittlung von Zeilenmerkmalen, die eine Korrelationsbeziehung mit dem zu ändernden Spaltenmerkmal besitzen.
S2) Bestimmung der zwangsläufigen Änderungsausprägungen der korrelierenden Zeilenmerkmale anhand der Korrelationsbeziehungen zum zu ändernden Spaltenmerkmal, um die Auswirkung der geforderten Merkmaländerung zu ermitteln.
S3) Ermittlung von Zeilenmerkmalen, die eine relevante Restriktionsbeziehung mit der geforderten Änderungsausprägung des zu ändernden Spaltenmerkmals besitzen.
S4) Bestimmung der Änderungsausprägung des beschränkten Zeilenmerkmals, um keine Unzulässigkeiten durch die geforderte Änderung des Spaltenmerkmals zu erzeugen.

Im Gegensatz zur Zeilenuntersuchung repräsentieren die ermittelten Merkmaländerungen aus der Spaltenuntersuchung, aufgrund der Beschreibungslogik des Abhängigkeitsmodells, zwangsläufige Merkmaländerungen, die ausgelöst werden von der geforderten Merkmaländerung.

Durch die erste Durchführung der direkten Implikationsanalyse werden weitere Merkmaländerungen ermittelt, die benötigt bzw. zwangsläufig ausgelöst werden, um die Initialänderungsbedarfe zu erfüllen. Aufgrund des konzeptionellen Aufbaus des Abhängigkeitsmodells und der Tatsache, dass die Initialänderungsbedarfe als Merkmale von Produkt-, Informations- oder Energieobjekten vorliegen (siehe Unterkapitel 8.1), sind diese ermittelten Merkmaländerungen nach der ersten Implikationsanalyse

ausschließlich Prozessmerkmaländerungen. Im nächsten Schritt der Auswirkungsanalyse wird die beschriebene direkte Implikationsanalyse auf die neuermittelten Merkmaländerungen angewandt, um deren Auswirkung zu untersuchen und weitere Merkmaländerungen zu bestimmen. Hierbei ist zu beachten, dass für *zwangsläufige Merkmaländerungen*, die aufgrund einer Korrelationsbeziehung ausgelöst werden, bei der Zeilenuntersuchung nur Restriktionsbeziehungen betrachtet werden, da diese *zwangsläufigen Merkmaländerungen* ungewollte Änderungen repräsentieren. Dieser Schritt wird anschließend iteriert, bis alle so ermittelten Merkmaländerungen analysiert wurden und keine neuen Merkmaländerungen ermittelt werden. Das Resultat der Änderungswirkungsanalyse beschreibt die Propagationen der Initialänderungsbedarfe auf die anderen Merkmale des Fertigungssystems und dessen Fähigkeiten. Hierbei beinhaltet das Resultat die Merkmaländerungen einschließlich ihrer Typen (initial, benötigt oder zwangsläufig) sowie die dazugehörigen Abhängigkeitsbeziehungen zwischen den Merkmaländerungen.

Erstellung eines Baumgraphen

Wie einleitend erwähnt, werden die ermittelten Änderungspropagationen aus der Änderungsauswirkungsanalyse als Baumgraph dargestellt. Ein Baumgraph besteht dabei aus einem Wurzelknoten, inneren Knoten, Blätterknoten und gerichteten Kanten, die die Knoten miteinander verbinden. Der Wurzelknoten des Baumgraphen wird dadurch charakterisiert, dass er ausschließlich ausgehende Kanten besitzt. Innere Knoten des Baumgraphen besitzen eingehende sowie ausgehende Kanten. Blätterknoten hingegen besitzen ausschließlich eingehende Kanten. Baumgraphen eignen sich hierbei sehr gut für die Analyse von Änderungspfaden und erleichtern somit die Generierung von Änderungsmöglichkeiten [RTC+05]. In der vorliegenden Arbeit repräsentieren die Knoten des Baumgraphen die ermittelten Merkmaländerungen. Der Wurzelknoten des Baumgraphen beschreibt dabei eine Merkmaländerung des Initialänderungsbedarfs. Die darauffolgenden Knoten repräsentieren die Prozessmerkmaländerungen, die direkt durch die Merkmaländerung des Initialbedarfs ausgelöst werden. Die Knoten, die wiederum direkt auf die Prozessmerkmaländerungsknoten folgen, spiegeln die ermittelten Merkmaländerungen aus der nachfolgenden direkten Implikationsanalyse wider. Analog dazu werden für alle Merkmaländerungen, die durch die verschiedenen Iterationen der direkten Implikationsanalyse ermittelt wurden, innere Knoten oder Blätterknoten erstellt. Hierbei werden *zwangsläufige Merkmaländerungen* mit einer gestrichelten, und *benötigte Merkmaländerungen* mit einer durchgezogenen Umrandung dargestellt. Die Kanten des Baumgraphen repräsentieren hingegen die Abhängigkeitsbeziehungen zwischen zwei Merkmaländerungen. Eine Kante beschreibt hierbei, dass die Merkmaländerung des Startknotens aufgrund der von der Kante repräsentierten Abhängigkeitsbeziehung die Merkmaländerung des Zielknotens auslöst. Eine beispielhafte Darstellung des Baumgraphen ist am Ende des Unterkapitels in Abbildung 8-7 dargestellt, in Zusammenhang mit dem Anschauungsbeispiel.

Generierung von Änderungsmöglichkeiten und Anschauungsbeispiel

Der zuvor erstellte Baumgraph repräsentiert streng genommen bereits an sich eine Änderungsmöglichkeit zur Erfüllung des Initialänderungsbedarfs, der vom jeweiligen Wurzelknoten repräsentiert wird. Für die Generierung von weiteren Änderungsmöglichkeiten müssen jedoch noch Teilbaumgraphen aus den zuvor erstellten Baumgraphen gebildet werden, die folgende Charakteristika aufweisen:

a) Der Wurzelknoten des Teilbaumgraphen ist identisch mit dem Wurzelknoten des vollständigen Baumgraphen.
b) Der Teilbaumgraph beinhaltet mindestens einen inneren Knoten, der eine benötigte Prozessmerkmaländerung darstellt und eine direkte Abhängigkeit mit dem Wurzelknoten besitzt.

c) Der Teilbaumgraph beinhaltet für jeden inneren Knoten aus b) mindestens einen Knoten, der eine Ressourcenmerkmaländerung darstellt und eine direkte Korrelationsbeziehung oder eine indirekte Korrelationsbeziehung über andere Prozessmerkmaländerungen zum inneren Knoten besitzt.
d) Der Teilbaumgraph beinhaltet alle Knoten des vollständigen Braumgraphen, die eine direkte Restriktionsbeziehung mit den Knoten des Teilbaumgraphen besitzen.
e) Die Enden des Teilbaumgraphen sind Blätterknoten des vollständigen Baumgraphen.

Alle Teilbaumgraphen, die diese Charakteristika aufweisen, repräsentieren valide Änderungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung der beschriebenen Informationen innerhalb der Abhängigkeitsmodelle. Kombinationen der Teilbaumgraphen können ebenfalls valide Änderungsmöglichkeiten darstellen. Hierbei muss jedoch sichergestellt werden, dass die Teilbaumgraphen keine widersprüchlichen Merkmaländerungen besitzen. Die generierten Änderungsmöglichkeiten repräsentieren keine konkreten technischen Umbauten, sondern ausschließlich Merkmaländerungen. Aufgrund dessen sind die generierten Änderungsmöglichkeiten losgelöst von vorhandenen Technologien, die zur Umsetzung genutzt werden können, und bilden eine gute Basis für Ingenieure, um konkrete technische Lösungen zu finden, ohne sie dabei zu stark einzuschränken. Hierbei ist zu beachten, dass durch die Auswahl einer technischen Lösung sich ggf. weitere Ressourcenmerkmale ändern können, die nicht in der Änderungsmöglichkeit aufgeführt sind. Beispielsweise werde angenommen, dass laut der generierten Änderungsmöglichkeit nur die Drehzahl eines Motors erhöht werden müsste. Aufgrund dessen, dass alle erhältlichen Motoren mit einer größeren Drehzahl ebenfalls eine größere Außenbreite besitzen, müsste jedoch hierbei ebenfalls analysiert werden, welche Auswirkungen die Erhöhung der Breite des Motors hätte.

Die beschriebene Methode zur Generierung von Änderungsmöglichkeiten soll anhand des Beispiels der Bohrstation aus Kapitel 7 veranschaulicht werden. Der Übersichtlichkeit halber wird hierbei auf das qualitative Abhängigkeitsmodell der Bohrstation zurückgegriffen. In diesem Beispiel wird angenommen, dass ein Initialänderungsbedarf bezüglich der Erhöhung des Merkmals Lochtiefe hinsichtlich der Bohrfähigkeit besteht. Die MDM-Darstellung des Abhängigkeitsmodells der Bohrstation bezüglich dessen Bohrfähigkeit ist in Abbildung 8-6 abgebildet. Zusätzlich visualisiert die Abbildung die Iterationen innerhalb der Änderungsauswirkungsanalyse für den beschriebenen Initialänderungsbedarf. Hierbei ist dargestellt, dass in der ersten direkten Implikationsanalyse zunächst die Zeile 9 der Matrix untersucht wird und eine positive Korrelationsbeziehung zum Prozessmerkmal *Bohrungstiefe* ermittelt wird. Da im Initialänderungsbedarf das Merkmal *Lochtiefe* erhöht werden soll, muss das Merkmal *Bohrungstiefe* aufgrund der positiven Korrelationsbeziehung ebenfalls erhöht werden, um die geforderte Erhöhung der *Lochtiefe* zu erzeugen. Zudem wird bei der Spaltenuntersuchung dieser direkten Implikationsanalyse ermittelt, dass die Erhöhung der *Lochtiefe* zwangsläufig dazu führt, dass das Merkmal *Prozesszeit* aufgrund einer positiven Korrelationsbeziehung in der Matrixspalte „I“ ebenfalls erhöht wird. Bei der nächsten direkten Implikationsanalyse wird die Zeile 6, die das ermittelte Merkmal *Bohrungstiefe* repräsentiert, untersucht. Hierbei wird eine Kleiner-gleich Restriktionsbeziehung mit dem Ressourcenmerkmal *Spannutlänge* und eine positive Korrelationsbeziehung mit dem Ressourcenmerkmal *BohrungstiefeVariable* ermittelt. Aufgrund dessen kann geschlussfolgert werden, dass die zuvor ermittelte benötigte Erhöhung des Prozessmerkmals *Bohrungstiefe* durch die Erhöhung des Ressourcenmerkmals *BohrungstiefeVariable* erreicht werden kann. Zudem könnte eine Erhöhung des Ressourcenmerkmals *Spannutlänge* benötigt werden, damit die zuvor ermittelte Erhöhung des Merkmals *Bohrungstiefe* zulässig ist. Die Erhöhung des Merkmals *Spannutlänge* ergibt sich aus der zur Restriktionsbeschränkung gehörigen positiven Korrelationsbeziehung. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund des

qualitativen Abhängigkeitsmodells keine exakte Aussage über die Restriktionsbeziehung gemacht werden kann. Dies bedeutet, dass bei einer quantitativen Betrachtung die Erhöhung des Merkmals *Bohrungstiefe* evtl. nicht gegen die Kleiner-gleich-Restriktionsbeziehungen verstößt und dementsprechend diese Restriktionsbeziehung die quantitative Merkmaländerung nicht beschränkt. Des Weiteren wird in der direkten Implikationsanalyse ermittelt, dass die zwangsläufige Erhöhung des Merkmals *Prozesszeit* eine weitere zwangsläufige Erhöhung des Ausgangsproduktmerkmals *Bearbeitungszeit* auslöst aufgrund einer positiven Korrelationsbeziehung in der Matrixspalte „H“. Die Zeilenuntersuchung für das Merkmal *Prozesszeit* ergibt in diesem Fall keine weiteren Merkmaländerungen. Grund hierfür ist, dass ausschließlich Korrelationsbeziehungen in der Zeile 8 vorhanden sind und die Änderung des Merkmals *Prozesszeit* eine *zwangsläufige Merkmaländerung* ist, die durch eine Korrelationsbeziehung ausgelöst wurde. Da die beiden ermittelten benötigten Ressourcenmerkmaländerungen und die zwangsläufige Produktmerkmaländerung keine weiteren Merkmaländerungen auslösen, unter der Berücksichtigung des vorliegenden Abhängigkeitsmodells, endet die Änderungsauswirkungsanalyse.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	**MDM: Bohren**	**R Bohrer:Spannutlänge**	**R VertikalAntrieb:Geschwindigkeit**	**R SPS:BohrungstiefeVariable**	**R SPS:VorschubgeschwindigkeitVariable**	**P Bohren:Bohrungstiefe**	**P Bohren:Vorschubgeschwindgkeit**	**P Bohren:Prozesszeit**	**Prod_O Ausgangsprodukt:Lochtiefe**	**Prod_O Ausgangsprodukt:Bearbeitungszeit**
2	**R Bohrer:Spannutlänge**							3.	1.	
3	**R VertikalAntrieb:Geschwindigkeit**									
4	**R SPS:BohrungstiefeVariable**									
5	**R SPS:VorschubgeschwindigkeitVariable**	2.		2.						
6	**P Bohren:Bohrungstiefe** 2.	<=;+		+						
7	**P Bohren:Vorschubgeschwindgkeit**		=;+		+					
8	**P Bohren:Prozesszeit** 3.					1.	-		+	
9	**Prod_O Ausgangsprodukt:Lochtiefe**	1.				+				
10	**Prod_O Ausgangsprodukt:Bearbeitungszeit**							+		

Abbildung 8-6 MDM-Darstellung des Abhängigkeitsmodells der Bohrstation einschließlich Iterationen der Änderungsauswirkungsanalyse

Abbildung 8-7 illustriert die beschriebenen Ergebnisse der Änderungsauswirkungsanalyse als Baumgraph. Die Farben der Knoten spiegeln hierbei die zur Merkmaländerung zugehörigen Objekttypen wider. Hierbei ist zu erkennen, dass der Wurzelknoten des Baumgraphen die Merkmaländerung des Initialänderungsbedarfs darstellt. Der nachfolgende innere Knoten repräsentiert die daraus resultierende *benötigte Merkmaländerung* des Prozessmerkmals *Bohrungstiefe* und die *zwangsläufige Merkmaländerung* des Prozessmerkmals *Prozesszeit*. Die zwei grauen Blätterknoten des Baumgraphen beschreiben die benötigten Ressourcenmerkmaländerungen, die wiederum aus der vorhandenen Restriktions- und Korrelationsbeziehung zum Prozessmerkmal *Bohrungstiefe* resultieren. Der rot gestrichelt umran-

dete Blattknoten beschreibt die zwangsläufige Änderung des Ausgangsproduktmerkmals *Bearbeitungszeit*. Diese Änderung resultiert aus einer Korrelationsbeziehung zum Prozessmerkmal *Prozesszeit.* Der in Abbildung 8-7 dargestellte Baumgraph repräsentiert hierbei die einzige Änderungsmöglichkeit, da kein weiterer Teilbaumgraph erstellt werden kann, der die oben beschriebenen Charakteristika aufweist. Die dargestellte Änderungsmöglichkeit beschreibt, dass die geforderte Erhöhung des Produktmerkmals *Lochtiefe* durch die Erhöhung des Prozessmerkmals *Bohrungstiefe* erreicht werden kann. Des Weiteren führt die Erhöhung des Merkmals *Lochtiefe* ebenfalls zu einer Erhöhung des Prozessmerkmals *Prozesszeit*, was wiederum zu der Erhöhung des Ausgangsproduktmerkmals *Bearbeitungszeit* führt. Die Erhöhung des Prozessmerkmals *Bohrungstiefe* kann wiederum erreicht werden, in dem die Ausprägung des Ressourcenmerkmals *BohrungstiefeVariable* der SPS der Bohrstation erhöht wird. Diese Softwarevariable der SPS hat einen Einfluss auf die Bohrungstiefe, da in diesem Beispiel die SPS durch diese Softwarevariable den vertikalen Verfahrweg der Bohrmaschine steuert. Die dadurch erreichte Erhöhung des Prozessmerkmals *Bohrungstiefe* ist jedoch durch die Ausprägung des Ressourcenmerkmals *Spannutlänge* des Bohrers beschränkt, wodurch ebenfalls eine Erhöhung dieses Ressourcenmerkmals nötig ist. Der korrespondierende quantitative Baumgraph zum visualisierten Baumgraph aus Abbildung 8-7 beinhaltet lediglich die quantitativen Änderungsausprägungen der Merkmale, anstatt der *Änderungsrichtung*, und die quantitativen Abhängigkeitsbeziehungen. Abbildung 8-8 zeigt den korrespondierenden quantitativen Baumgraph.

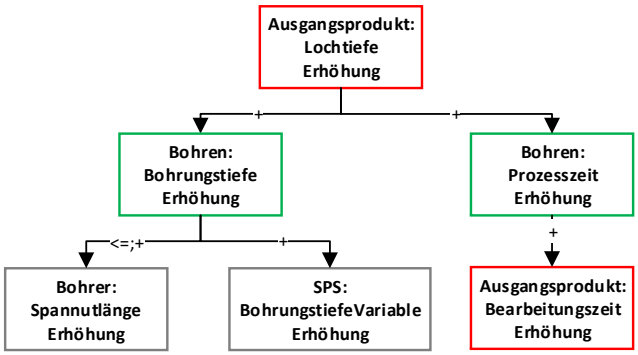

Abbildung 8-7 Darstellung der Ergebnisse der qualitativen Änderungsauswirkungsanalyse als Baumgraph

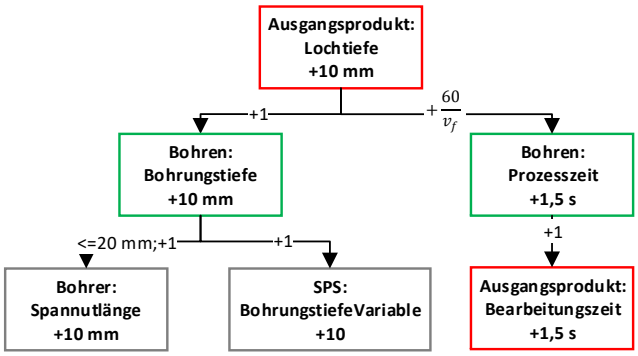

Abbildung 8-8 Darstellung der Ergebnisse der quantitativen Änderungsauswirkungsanalyse als Baum-

9 Validierung der entwickelten Modelle und Methoden

In diesem Kapitel werden drei Fallstudien vorgestellt, die für die Validierung der entwickelten Methoden sowie der dazugehörigen Modellierungskonzepte durchgeführt wurden. Hierbei wurden die Methoden jeweils auf eine industrielle Hochspannungsprüfmaschine (siehe Unterkapitel 9.1), eine automatisierte Zigarettenmaschine (siehe Unterkapitel 9.2) und ein automatisiertes Nietsystem (siehe Unterkapitel 9.3) angewandt. Im Rahmen der Fallstudien wurden ebenfalls unstrukturierte Interviews mit Experten aus der Industrie geführt, um eine Einschätzung bezüglich der Anwendbarkeit sowie Vorteilhaftigkeit der Methoden in der Praxis zu erhalten. Für die Durchführung der Fallstudien wurden die Methoden in einer prototypischen Softwareapplikation implementiert. Die Softwareapplikation wurde in der Programmiersprache *Java* umgesetzt und mittels der Entwicklungsumgebung *Eclipse* implementiert und ausgeführt.

9.1 Fallstudie 1: Hochspannungsprüfmaschine

In dieser Fallstudie wurden die Methoden an einer industriellen Hochspannungsprüfmaschine eines Sondermaschinenbauers angewandt. Aus Geheimhaltungsgründen können die Daten der Maschine nur anonymisiert dargelegt werden. Die betrachtete Industriemaschine wurde genutzt, um zu prüfen, ob produzierte Verbindungsklemmen gegen Überspannungen gesichert sind. Die Maschine bestand zum Zeitpunkt der Fallstudie aus einer Station für die Pol-zu-Pol-Hochspannungsprüfung (im weiteren Verlauf auch interne Prüfung genannt), einer Station für die Pol-zu-Potential-Hochspannungsprüfung (im weiteren Verlauf auch externe Prüfung genannt), einer Aufnahme- und Abgabestation für die zu prüfenden bzw. geprüften Verbindungsklemmen sowie einem Rundschalttisch, der den Materialfluss zwischen den Stationen gewährleistete. Ziel der Fallstudie war es, verschiedene Prüfstationen des Unternehmens anhand der beschriebenen Modellierungskonzepte zu beschreiben und basierend darauf die Methoden anzuwenden, um folgendes zu analysieren:

1. Analyse von möglichen Konfigurationen der Hochspannungsprüfmaschine auf Basis der Fähigkeiten der Stationen.
2. Analyse, ob die Konfigurationen bestimmte Verbindungsklemmenvarianten verarbeiten können.
3. Ermittlung von Änderungsmöglichkeiten für Änderungsbedarfe, die aus den beiden vorherigen Analysen hervorgegangen sind.

Um verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten zu erhalten, wurden in der Fallstudie eine Station für die interne Prüfung (*689_BR294*) und drei verschiedene Stationen für die externe Prüfung (*906_BR862*, *485_BR221* und *206_BR294*) betrachtet. Das Vorgehen in der Fallstudie war dreigeteilt. In den ersten beiden Teilen der Fallstudie wurden zunächst die Fähigkeitsmodelle und anschließend die dazugehörigen Abhängigkeitsmodelle erstellt. Im dritten Teil der Fallstudie wurden auf Basis der erstellten Modelle und der implementierten Softwareapplikation die Methoden angewandt, um die oben beschriebenen Ziele der Fallstudie zu erreichen. Die automatisiert erzeugten Analyseergebnisse wurden anschließend mit den Konstrukteuren des Unternehmens begutachtet. Des Weiteren wurde ein Experteninterview bezüglich der Anwendbarkeit und Vorteilhaftigkeit der entwickelten Methoden geführt. Im Folgenden werden die drei Teile der Fallstudie näher beschrieben.

9.1.1 Erstellung der Fähigkeitsmodelle

Für die Erstellung der Fähigkeitsmodelle wurde zunächst, auf Basis von Interviews mit einem Konstrukteur, der technische Prozess der betrachteten Hochspannungsprüfmaschine in der *Formalisierten Prozessbeschreibung* abgebildet (siehe Abbildung A-1). Hierbei wurde der gesamte Prozess, von der Abnahme der Verbindungsklemmen bis hin zur Übergabe bzw. Aussortierung der geprüften Verbindungsklemmen, modelliert. Da der Fokus der Fallstudie auf den Teilprozessen der internen und externen Prüfung lag, wurden anschließend diese beiden Teilprozesse im Detail analysiert und beschrieben. Abbildung 9-1 und Abbildung A-2 illustrieren den dekomponierten internen und externen Prüfprozess in der *Formalisierten Prozessbeschreibung*. Die Prozessabläufe der drei betrachteten Externen-Prüfstationen innerhalb der externen Prüfung waren identisch und entsprachen dem abgebildeten Prozess in Abbildung A-2. Sie unterschieden sich lediglich in den verwendeten technischen Ressourcen. Auf Basis der Prozessbeschreibungen in der *Formalisierten Prozessbeschreibung* wurden anschließend die Fähigkeitsmodelle manuell in AML erstellt. Hierbei wurden die Objekte aus der Prozessbeschreibung mit Merkmalen, inklusive ihrer Ausprägungen, weiter ausspezifiziert. Die Ermittlung der Merkmale und deren Ausprägungen erfolgten durch Interviews mit dem Konstrukteur. Die Merkmale wurden im AML-Modell als Attribute abgebildet. Abbildung 9-2 zeigt einen Ausschnitt aus dem AML-Fähigkeitsmodell der Internen-Prüfstation *689_BR294*.

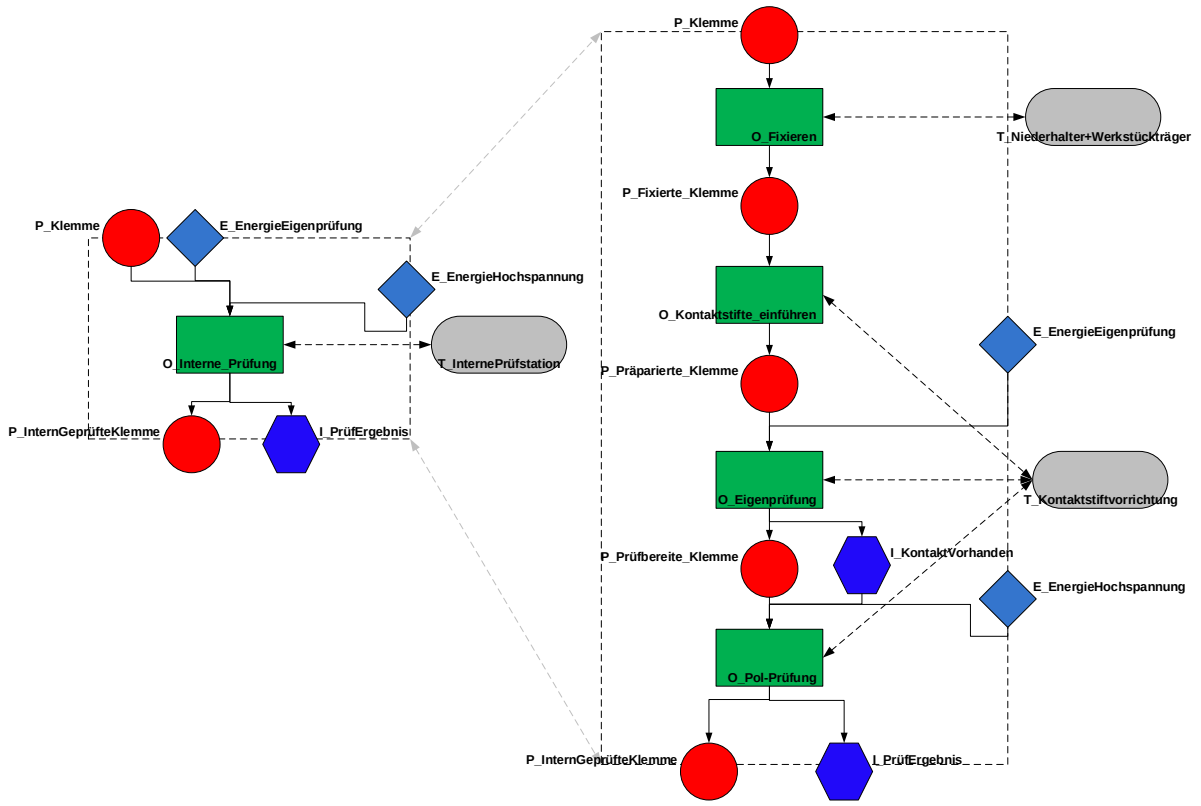

Abbildung 9-1 Dekomposition des internen Prüfprozesses

Im Ausschnitt ist zu erkennen, dass die Prozess-, Produkt-, Information-, und Energieobjekte aus der FPB (siehe Abbildung 9-1) im AML-Modell vorhanden waren und nach ihrem Objekttypen kategorisiert wurden. Die Ressourcenobjekte wurden ebenfalls im AML-Fähigkeitsmodell unter dem *InternalElement RessourceHierarchy* abgebildet, was jedoch aus Platzgründen nicht im Ausschnitt dargestellt wird. Die Verbindungen zwischen den Objekten wurden anhand der definierten *Interfaces* abgebildet.

Beispielsweise ist im Ausschnitt abgebildet, dass das Produkt *Klemme* das Eingangsprodukt des Teilprozesses *Fixieren* war. Des Weiteren ist in Abbildung 9-2 zu sehen, dass das Produkt *Klemme* neun Merkmale besaß, die als Attribute dargestellt sind. Das Attribut *Laenge* beispielsweise hatte dabei die Ausprägung 10-166 mit der Einheit Millimeter. Dieses Attribut ist so zu interpretieren, dass die zugehörige technische Ressource zum Teilprozess *Fixieren* Produkte verarbeiten konnte, die eine Länge zwischen 10 und 166 Millimeter besaßen. Analog zu diesem Vorgehen wurden die Fähigkeitsmodelle der drei Externen-Prüfstationen und von zwei verschiedenen Transportsystemen, einem Rundschalttisch und einer Umlaufkette, erstellt. Ein Ausschnitt des Fähigkeitsmodells der Externen-Prüfstation *906_BR862* ist in Abbildung A-3 dargestellt. Abbildung A-4 zeigt einen Ausschnitt des Fähigkeitsmodells des Rundschalttisches. Hierbei ist anzumerken, dass die Benennungen der Produktobjekte im Fähigkeitsmodell der Externen-Prüfstation nicht den Bezeichnungen aus Abbildung A-2 entsprechen, da die Fähigkeit der Prüfstation losgelöst vom Gesamtprozess der Hochspannungsprüfmaschine beschrieben wurde. Dementsprechend musste nicht zwangsläufig eine intern geprüfte Klemme das Eingangsprodukt der Fähigkeit sein. Des Weiteren ist anzumerken, dass der Rundschalttisch mit zwei Transportfähigkeiten modelliert wurde, da er zwei verschiedene Konfigurationen besaß. Beide Fähigkeitsbeschreibungen waren hierbei fast identisch. Sie unterschieden sich in ihren technischen Ressourcen hinsichtlich der Werkstückaufnahmen, und aufgrund dessen wichen ebenfalls die Produktobjektbeschreibungen der beiden Fähigkeitsbeschreibungen voneinander ab.

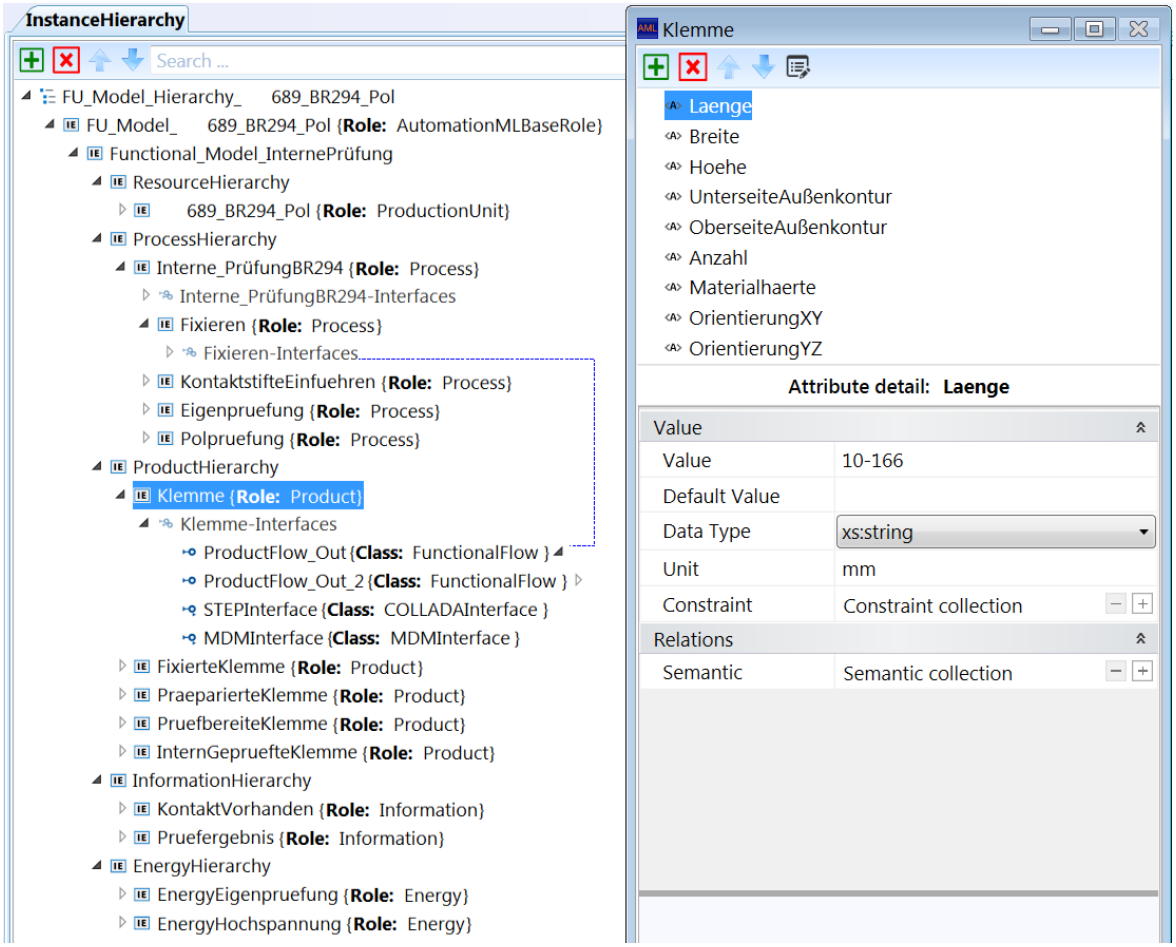

Abbildung 9-2 Ausschnitt aus der Fähigkeitsbeschreibung der Internen-Prüfstation (689_BR294)

9.1.2 Erstellung der Abhängigkeitsmodelle

Im zweiten Teil der Fallstudie wurden die Abhängigkeiten der Merkmale zwischen den Objekten der erstellten Fähigkeitsmodelle der Internen- und Externen-Prüfstationen erstellt. Aufgrund von zeitlichen Restriktionen, die vom Unternehmen vorgegeben waren, konnten nur für die zwei der drei Externen-Prüfstationen, *906_BR862* und *206_BR294*, Abhängigkeitsmodelle erstellt werden. In diesem Teil der Fallstudie wurden für die Interne-Prüfstation vier Multiple-Domain-Matrizen erstellt, je eine Matrix für eine Teilfähigkeit. Analog dazu wurden für die beiden Externen-Prüfstationen jeweils fünf MDMs erstellt. Elf der insgesamt 14 MDMs hatten hierbei eine Dimension von mindestens 40x40. Die verbleibenden Matrizen hatten eine Dimension zwischen 10x10 und 20x20. Die Ermittlung der Abhängigkeiten geschah hierbei teils durch Interviews mit dem Konstrukteur und teils durch die Analyse von CAD-Modellen. Die Matrizen selbst wurden manuell in *Microsoft Excel* beschrieben. Ein Ausschnitt aus der MDM der Teilfähigkeit *KontaktstifteEinführen* der Internen-Prüfstation ist in Abbildung 9-3 dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass in der MDM sowohl qualitative als auch quantitative Abhängigkeiten erfasst wurden, um den Modellierungsaufwand teilweise zu reduzieren. Beispielsweise ist zu sehen, dass die Abhängigkeit zwischen dem Merkmal *Aufnahme-090 AussparungAnzahl* und dem Merkmal *100-Kontaktstiftleiste AnzahlStifte* als eine Gleich-Restriktionsbeziehung qualitativ beschrieben wurde, mit einer dazugehörigen positiven Korrelationsbeziehung. Zwischen dem Merkmal *100-Kontaktstiftleiste Laengstkante* und dem Merkmal *100-Kontaktstiftleiste AnzahlStifte* hingegen ist zu sehen, dass die Korrelationsbeziehung einen Faktor enthielt, der noch von anderen Merkmalen abhing. Hierbei ist zu beachten, dass bei der quantitativen Beschreibung der Korrelationsbeziehungen das Zeilenmerkmal nicht explizit im mathematischen Term aufgeführt wurde, da die Terme so umformuliert wurden, dass bei der Analyse die Änderungsausprägung des Zeilenmerkmals lediglich mit dem Term multipliziert werden musste. Des Weiteren wurden in dieser Fallstudie die Restriktionsbeziehungen nicht quantitativ beschrieben, da die Restriktionen bei jeglicher Ausprägung einer relevanten Merkmaländerung verletzt wurden. Dementsprechend hätte die quantitative Modellierung der Restriktionsbeziehungen hierbei zu keinem Mehrwert geführt. Die Abhängigkeitsmodelle wurden anschließend in das eigenentwickelte XML-Schema (siehe Unterkapitel 7.4) überführt. Die Überführung erfolgte hierbei automatisiert mithilfe der implementierten Softwareapplikation. Die XML-Beschreibung der MDMs wurde anschließend anhand von *ExternalInterfaces* in AML mit den zuvor erstellten Fähigkeitsmodellen manuell verknüpft.

9.1.3 Anwendung der entwickelten Methoden und Experteninterview

Im dritten Teil der Fallstudie wurden auf Basis der erstellten Modelle und mittels der Softwareapplikation eine Änderungsbedarfsanalyse bei der Kombination von Fertigungsfähigkeiten und eine Änderungsbedarfsanalyse bei der Fertigung neuer bzw. veränderter Produkte durchgeführt. Als Informationsbasis für die Änderungsbedarfsanalysen benötigte die Softwareapplikation die erstellten AML-Modelle. Für die Änderungsbedarfsanalyse bei der Kombination von Fertigungsfähigkeiten benötigte die Softwareapplikation zusätzlich eine Sequenz von geforderten Fertigungsfähigkeiten als Liste in *Microsoft Excel*. Diese Änderungsbedarfsanalyse gab hierbei Auskunft über die mögliche Kombination von Stationen hinsichtlich ihrer Fähigkeiten und erfüllte damit das erste Teilziel der Fallstudie. Die Resultate dieser Änderungsbedarfsanalyse wurden in Excel-Tabellen ausgegeben, die die Ergebnisse des sequentiellen Abgleichs der Fähigkeitsmodelle (siehe Unterkapitel 8.1.2) beinhalteten.

KontaktstifteEinführen	R 100-Kontaktstiftleiste AnzahlStifte	R 100-Kontaktstiftleiste Bohrunganzahl	R 100-Kontaktstiftleiste Bohrungsdurchmesser	R 100-Kontaktstiftleiste Bohrungsabstand1	R 100-Kontaktstiftleiste Bohrungsabstand2
R Aufnahme-090 AussparungAnzahl	=;+				
R Aufnahme-090 AussparungLaenge					
R Aufnahme-090 AussparungBreite					
R Aufnahme-090 OrientierungXY					
R Aufnahme-090 yPosition					
R 100-Kontaktstift Laenge					
R 100-Kontaktstift Durchmesser			=;+		
R 100-Kontaktstift Kopfform					
R 100-Kontaktstiftleiste Laengskante	>;+ 1/(Bohrungsabstand1+Bohrungsabstand2+2*Durchmesser)			>;+ 1/(AnzahlStifte/2)	>;+ 1/(AnzahlStifte/2-1)
R 100-Kontaktstiftleiste AnzahlStifte		=;+			
R 100-Kontaktstiftleiste Bohrunganzahl	=;+				
R 100-Kontaktstiftleiste Bohrungsdurchmesser					
R 100-Kontaktstiftleiste Bohrungsabstand1					
R 100-Kontaktstiftleiste Bohrungsabstand2					
R 100-Kontaktstiftleiste OrientierungXY					
R 100-Kontaktstiftleiste OrientierungYZ					
R 100-Kontaktstiftaufnahme Laengskante					
R 061-HandlingH12x40L yVerfahrweg					
P KontaktstifteEinfuehren zuPolorientierungXY					
P KontaktstifteEinfuehren zuObjektanzahl	+ 2*Polanzahl				
P KontaktstifteEinfuehren zuPolanzahl	+ 2				

Abbildung 9-3 Ausschnitt aus der MDM der Teilfähigkeit *KontatkstiftEinführen* der Internen-Prüfstation

Für die Änderungsbedarfsanalyse bei der Fertigung neuer bzw. veränderter Produkte benötigte die Softwareapplikation zudem noch eine Beschreibung des geforderten Eingangsprodukts in Form einer Liste an Produktmerkmalen, ebenfalls in *Microsoft Excel*. Diese Änderungsbedarfsanalyse erfüllte hierbei das zweite Teilziel der Fallstudie. Die Resultate dieser Änderungsbedarfsanalyse wurden ebenfalls in Excel-Tabellen ausgegeben, die die Ergebnisse des Abgleichs zwischen dem geforderten Produkt und der beschriebenen Fähigkeitsmodelle (siehe Unterkapitel 8.1.1) beinhalteten.

Anhand der ermittelten Änderungsbedarfe wurde anschließend die Methode für die Generierung von Änderungsmöglichkeiten (siehe Unterkapitel 8.2) angewandt. Die Ausführung der Methode übernahm dabei ebenfalls die erstellte Softwareapplikation. Als Informationsbasis für die Ausführung der Methode benötigte die Softwareapplikation die erstellten AML-Modelle inklusive der verknüpften MDMs

und die Resultate der Änderungsbedarfsanalysen als Excel-Tabellen. Durch die Durchführung der Methode für die Änderungsmöglichkeitsgenerierung wurde das dritte Teilziel der Fallstudie erreicht. Die Ergebnisse der Methode wurden als Änderungsbaumgraphen im Scalable Vector Graphics (SVG) Format ausgegeben.

Abschließend wurden die generierten Ergebnisse von Konstrukteuren des Unternehmens begutachtet. Zusätzlich wurde ein Experteninterview bezüglich der Anwendbarkeit und Vorteilhaftigkeit der entwickelten Methode mit zwei Konstrukteuren sowie dem Geschäftsführer des Unternehmens geführt.

Änderungsbedarfsanalyse bei der Kombination von Fertigungsfähigkeiten

Für die erste Änderungsbedarfsanalyse wurde eine Fähigkeitssequenz als einfache Liste in *Microsoft Excel* angegeben, die beschrieb, welche Fähigkeiten miteinander kombiniert werden sollten. Hierbei wurde zunächst angegeben, dass die Fähigkeit einer internen Prüfung sequentiell mit der Fähigkeit einer externen Prüfung kombiniert werden sollte. Anhand der geforderten Fähigkeitssequenz analysierte die Softwareapplikation die relevanten AML-Fähigkeitsmodelle nach der beschriebenen Vorgehensweise aus Unterkapitel 8.1.2.

Abbildung 9-4 zeigt die Analyseergebnisse der Kombination der Internen-Prüfstation *689_BR294* und der Externen-Prüfstation *906_BR862*. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Merkmale des Ausgangsprodukts *InternGeprueftеKlemme* der Fähigkeit *Interne_Prüfung* der Station *689_BR294* mit den Merkmalen des Eingangsprodukts der Fähigkeit *Externe_Prüfung* der Station *906_BR862* abgeglichen wurde. Beispielsweise ist hierbei zu erkennen, dass das Merkmal *Laenge* der beiden Produkte miteinander übereinstimmte, da das Ausgangsprodukt eine Länge von 10 bis 166 Millimeter besitzen konnte und die nachfolgende Fähigkeit ein Produkt mit einer Länge von 60 Millimeter benötigte. Bei dem Merkmal *Breite* hingegen konnte keine Übereinstimmung ermittelt werden, was entsprechend in der Spalte *Result* mit dem Eintrag *Nicht_erfuellt* markiert wurde. Alle Merkmale in der Abbildung, die als *Nicht_erfuellt* markiert wurden, repräsentierten Änderungsbedarfe und wurden als Input für die Änderungsmöglichkeitsgenerierung verwendet.

In der Abbildung ist zudem erkennbar, dass die Fähigkeit *Externe_Prüfung* die beiden Energieobjekte *EnergyEigenpruefung* und *EnergieHochspannung* als Eingangsobjekte benötigte. Da die vorgelagerte Fähigkeit keine Energieobjekte als Ausgangsobjekte besaß, wurden Platzhalterobjekte eingefügt. Das Abgleichergebnis in der Spalte *Result* wurde hierbei als *Nicht_relevant* angegeben, einerseits da in diesen Fällen Änderungen benötigt wurden, die über die Änderungen von Merkmalausprägungen hinausgingen und deshalb nicht in den späteren Analysen berücksichtigt werden sollten. Andererseits bestand die Möglichkeit, die benötigten Eingangsobjekte durch weitere Fähigkeiten bereitzustellen. Aufgrund der ermittelten Nichtübereinstimmungen war die sequentielle Kombination dieser beiden Fähigkeiten nicht zulässig, was mit einem *Not OK* beim *Overall Matching Result* gekennzeichnet wurde (siehe Abbildung 9-4). Abbildung B-1 und Abbildung B-2 zeigen die Änderungsbedarfsanalyse der Kombination der Fähigkeit der Internen-Prüfstation mit den Fähigkeiten der beiden verbleibenden Externen-Prüfstationen. Hierbei ist in Abbildung B-1 zu erkennen, dass die beiden Fähigkeiten der Station *689_BR294* und *206_BR294* ohne technische Änderungen miteinander kombiniert werden könnten, wenn die beiden Eingangsenergieobjekte der nachgelagerten Fähigkeit von einer weiteren Fähigkeit bereitgestellt werden.

Initial Capability	Interne_PrüfungBR294(PolZuPol)	**Subsequent Capability**	906_BR862_PotentialZuPol_v01+Externe_PrüfungBR862(PotentialZuPol)	**Overall Matching Result**	Not OK		
Checked Output Element	**Parameter**	**Required Value**	**Checked Input Element**	**Parameter**	**Assurance Value**	**Matching Value**	**Result**
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Breite	28	(class fpbElements.Product) Klemme	Breite	36		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Laenge	10-166	(class fpbElements.Product) Klemme	Laenge	60	60	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Hoehe	18	(class fpbElements.Product) Klemme	Hoehe	21.5		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Materialhaerte	{hart;weich}	(class fpbElements.Product) Klemme	Materialhaerte	hart	hart	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	(class fpbElements.Product) Klemme	UnterseiteAußenkontur	Serie2		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OberseiteAußenkontur	Serie1_ohne	(class fpbElements.Product) Klemme	OberseiteAußenkontur	Serie2_ohne		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OrientierungXY	90	(class fpbElements.Product) Klemme	OrientierungXY	180		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Anzahl	1-4	(class fpbElements.Product) Klemme	Anzahl	1	1	OK
(class fpbElements.Product) dummy	Eigenpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyEigenpruefung	Eigenpruefungsspannung	24-36		Nicht_relevant
(class fpbElements.Product) dummy	Potentialpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyHochspannung	Potentialpruefungsspannung	1000-2000		Nicht_relevant

Abbildung 9-4 Änderungsbedarfsanalyse der Kombination der Fähigkeiten von *689_BR294* und *906_BR862*

Des Weiteren wurde die gleiche Änderungsbedarfsanalyse mit einer Erweiterung der geforderten Fähigkeitssequenz durchgeführt. In der erweiterten Fertigungssequenz sollte erst eine interne Prüfung durchgeführt werden. Anschließend sollte eine Transportfähigkeit genutzt werden, worauf folgend die externe Prüfungsfähigkeit stattfinden sollte. Die Analyse konnte hierbei anhand der beschriebenen Fähigkeitsmodelle neun verschiedene Kombinationen von Fähigkeiten bestimmen. Die neun Kombinationen repräsentierten alle möglichen Kombinationsmöglichkeiten der geforderten Fähigkeitssequenz, da die Modelle für die interne Prüfungsfähigkeit mit einer von drei Transportfähigkeiten und einer von drei externen Prüfungsfähigkeiten kombiniert werden konnte. Es ist anzumerken, dass zwei der drei Transportfähigkeiten vom Rundschalttisch (siehe Abbildung A-4) bereitgestellt wurden. Die Teile der Analyseergebnisse für diese geforderte Fähigkeitssequenz sind in Abbildung B-3 und Abbildung B-4 dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass eine mögliche Fähigkeitskombination für die geforderte Fertigungssequenz aus der internen Prüfungsfähigkeit von *689_BR294,* der ersten Transportfähigkeit des Rundschaltisches und der externen Prüfungsfähigkeit von *206_BR294* bestand.

Änderungsbedarfsanalyse bei der Fertigung neuer bzw. veränderter Produkte

Für den zweiten Typen der Änderungsbedarfsanalyse wurde zunächst ein gefordertes Eingangsprodukt beschrieben. Das geforderte Eingangsprodukt wurde hierbei durch eine Liste an Produktmerkmalen spezifiziert und in Form einer Liste in *Microsoft Excel* gespeichert. Zusätzlich wurden in der Liste die Fähigkeiten aufgeführt, in denen das geforderte Eingangsprodukt verarbeitet werden sollte. Abbildung 9-5 zeigt eine Beschreibung des geforderten Eingangsprodukts, welches im Rahmen der Fallstudie genutzt wurde. Hierbei ist anzumerken, dass die Ausprägungen der Merkmale variiert wurden, um verschiedene Eingangsprodukte für die Änderungsbedarfsanalyse zu simulieren.

Eingangsproduktmerkmal	Wert	Einheit	Benötigte Fähigkeit
Laenge	50	mm	PolZuPol
Breite	28	mm	PotentialZuPol
Hoehe	18	mm	
Anzahl	10	int	
Materialhärte	hart	string	
PolorientierungXY	180	grad	
PolorientierungYZ	0	grad	
Polanzahl	7	int	
Polquerschnitt	4	mm²	
Polkontaktflaechenposition	3	mm	
Polkontaktflaechenkontur	rund	string	
UnterseiteAußenkontur	Serie1	string	
OberseiteAußenkontur	Serie1_ohne	string	
UnterseitePrüfflächen	Serie1	string	
OberseitePrüfflächen	Serie1_ohne	string	
Potentialpruefungsspannung	1000	volt	
Polpruefungsspannung	1000	volt	

Abbildung 9-5 Beschreibung des geforderten Eingangsprodukts der Fallstudie 1 in Microsoft Excel

Auf Basis der Fähigkeitsmodelle und der Beschreibung des Eingangsprodukts wurde von der implementierten Softwareapplikation die in Unterkapitel 8.1.1 beschriebene Methode ausgeführt. Abbildung 9-6 zeigt die generierten Ergebnisse der Änderungsbedarfsanalyse für die Kombination der Fähigkeiten von *689_BR294* und *906_BR862.* Die Spalte *Request Compatibility* in der Abbildung beinhaltet die Analyseergebnisse des Abgleichs des geforderten Eingangsprodukts mit den Fähigkeiten der Stationen. Die Spalte *Request Issues* beinhaltet die summierte Auflistung der Änderungsbedarfe, die sich aus dem Abgleich ergeben haben.

Name	Upstream Compatibility	Request Compatibility	Request Issues
689_BR294_PolZuPol_v02+Interne_PrüfungBR294		Not OK	Anzahl: Nicht_erfuellt
906_BR862_PotentialZuPol_v01+Externe_PrüfungBR862(PotentialZuPol)	Not OK	Not OK	PolorientierungXY: Nicht_erfuellt
			Laenge: Nicht_erfuellt
			Breite: Nicht_erfuellt
			Hoehe: Nicht_erfuellt
			Polanzahl: Nicht_erfuellt
			Polquerschnitt: Nicht_erfuellt
			UnterseiteAußenkontur: Nicht_erfuellt
			OberseiteAußenkontur: Nicht_erfuellt

Abbildung 9-6 Änderungsbedarfsanalyse für das geforderten Eingangsprodukts in Abbildung 9-5 für die Kombination *689_BR294* und *906_BR862*

Im Rahmen dieser Änderungsbedarfsanalyse wurde auf Basis des geforderten Eingangsprodukts nochmal eine Änderungsbedarfsanalyse hinsichtlich der Kombination der Fähigkeiten durchgeführt, da die Fähigkeiten teilweise Merkmale besaßen, die von bestimmten Eingangsproduktmerkmalen abhängig waren. Das Resultat der aktualisierten Analyse wird in Abbildung 9-6 unter der Spalte *UpstreamCompatibility* aufgeführt. In Abbildung B-5 ist beispielsweise ersichtlich, dass sich die Ausprägung des Merkmals *Anzahl* des Ausgangsprodukts der internen Prüfung von 1 bis 4 auf 1 bis 3,32 aufgrund des in Abbildung 9-5 beschriebenen geforderten Eingangsprodukts geändert hatte. Die Ausprägung ergab sich hierbei aus der Abhängigkeit zum Prozessmerkmal *zul.Objektanzahl* bei der Teilfähigkeit *Fixieren.* Dieses Prozessmerkmal ergab sich wiederum aus der geforderten Länge des Eingangsprodukts dividiert durch die Gesamtläge der Werkstückaufnahme der Internen-Prüfstation. Hierbei ist anzumerken, dass die Eingangs- und Ausgangsprodukte der Teilfähigkeit *KontaktstiftEinführen* ebenfalls das Merkmal *An-*

zahl besaßen, jedoch war die zulässige Objektanzahl in dieser Teilfähigkeit höher als bei der Teilfähigkeit *Fixieren.* Dementsprechend war die Merkmalausprägung der Teilfähigkeiten *Fixieren* die ausschlaggebende Ausprägung.

Generierung von Änderungsmöglichkeiten

Die Ergebnisse der ersten beiden Analysen sowie die erstellten Abhängigkeitsmodelle wurden anschließend von der Softwareapplikation als Input für die Durchführung der Methode zur Generierung von Änderungsmöglichkeiten (siehe Unterkapitel 8.2) verwendet. Hierbei ist anzumerken, dass, wenn im Ergebnis der beiden vorherigen Analysen dasselbe Merkmal als Änderungsbedarf aufgeführt wurde, die beiden geforderten Änderungsausprägungen zu einem Änderungsbedarf zusammengefasst wurden, wenn dies möglich war.

Abbildung 9–7 illustriert die Änderungsmöglichkeit für eine geforderte Erhöhung der Anzahl der zu prüfenden Klemmen der externen Prüfungsfähigkeit der Station *206_BR294* um sechs Einheiten. In den Änderungsbaumgraphen werden Produktmerkmaländerungen als rote Rechtecke visualisiert. Prozess- und Ressourcenmerkmaländerungen werden jeweils als grüne und graue Rechtecke dargestellt. Die Farbgebung orientiert sich dabei an der *Formalisierten Prozessbeschreibung*. Die Ausprägungen der Abhängigkeiten zwischen Merkmalen werden in den Änderungsbäumen in roter Schrift auf den Kanten visualisiert.

Die in Abbildung 9-7 dargestellte Änderungsmöglichkeit beschreibt dabei eine Änderung der Teilfähigkeit *AußenkontaktHerstellen*. Das Produkt *Klemme* repräsentiert hierbei das Eingangsprodukt der Teilfähigkeitsbeschreibung. In der Abbildung ist zu erkennen, dass das Merkmal *Anzahl* des Produkts *Klemme* um sechs Einheiten erhöht werden musste. Um diese geforderte Produktmerkmalerhöhung zu erreichen, war es zudem erforderlich, dass das Merkmal *zul.Objektanzahl* des Teilprozesses ebenfalls um sechs Einheiten erhöht wird. Dies resultierte aus einer einfachen positiven Korrelationsbeziehung zwischen diesen Merkmalen, die in der MDM modelliert war. Durch die weitere Analyse der dazugehörigen MDM hat die Softwareapplikation zudem ermittelt, dass die Erhöhung des Merkmals *zul.Objektanzahl* durch die Erhöhung des Merkmals *Aussparungsanzahl* der Ressourcen *BG-Außenkontakt-02* erreicht wurde. Aufgrund der abgebildeten quantitativen Korrelationsbeziehung musste das Merkmal *Aussparungsanzahl* hierbei um 42 Einheiten erhöht werden. Weiterhin wurde analysiert, dass diese Änderung aufgrund von Restriktionsbeziehungen weitere Änderungen als Auswirkungen hatte, wie beispielsweise die Erhöhung des Merkmals *Aussparungsanzahl* der Ressource *Holder* um ebenfalls 42 Einheiten. Hierbei ist zu erwähnen, dass der Änderungsbaum und die dargestellte Änderungsmöglichkeit identisch waren und keine weiteren Teilbäume ermittelt werden konnten, die weitere Änderungsmöglichkeiten repräsentiert hätten.

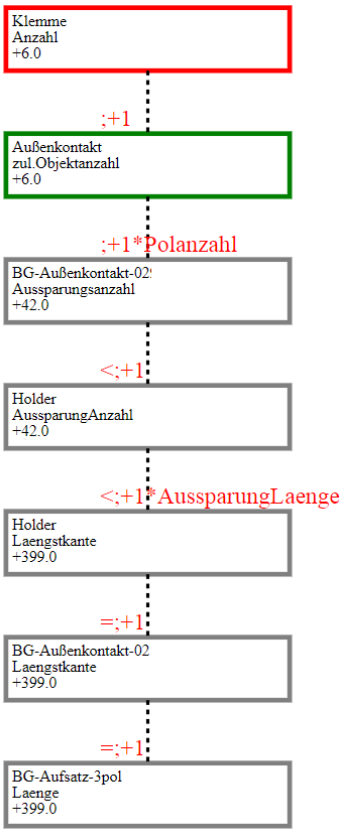

Abbildung 9-7 Generierte Änderungsmöglichkeit für *206_BR294*: Erhöhung der Produktanzahl

Für das geforderte Eingangsprodukt aus Abbildung 9-5 wurden in der Fallstudie über 40 Änderungsoptionen generiert. Zwei Konstrukteure des Unternehmens haben verschiedene der automatisch generierten Änderungsmöglichkeiten begutachtet und bestätigt, dass sie nachvollziehbar und korrekt waren. Hierbei ist anzumerken, dass einer der beiden Konstrukteure nicht an der Erstellung der Modelle beteiligt war. Des Weiteren benötigten die Konstrukteure eine kurze Einweisung, um die Änderungsbäume interpretieren zu können. Die Konstrukteure merkten jedoch an, dass sie nicht mit Gewissheit sagen konnten, ob alle relevanten Abhängigkeiten im Abhängigkeitsmodell enthalten waren.

Experteninterviews

Am Ende der Fallstudie und auf Basis der gesichteten Ergebnisse wurde ein unstrukturiertes Interview mit dem Geschäftsführer sowie den zwei Konstrukteuren des Unternehmens durchgeführt, um deren Einschätzung hinsichtlich der Anwendbarkeit und des Nutzens der Methoden zu erfahren. Die Teilnehmer standen den Methoden positiv gegenüber. Alle haben geäußert, dass die Methoden bei verschiedenen Anwendungen im Unternehmen nützlich wären. Als Beispiel wurde genannt, dass man mittels der Methoden schnell ermitteln könnte, welche Stationen genutzt werden könnten, wenn der Kunde eine neue Anfrage sendet, was meist aufgrund einer Produktänderung geschieht. Des Weiteren wurde angemerkt, dass man die Fähigkeitsmodelle auch dafür nutzen könnte, um nach Stationen zu suchen, die beispielsweise nur bestimmte Energiearten nutzen (z.B. pneumatisch). Mithilfe der Fähigkeitsmodelle könnten die Konstrukteure dann bereits einen guten Überblick erhalten, welche Stationen für ihre Zielkonstruktion genutzt werden könnte. Darüber hinaus wurde der Vorschlag gemacht den Modellen noch wirtschaftliche Informationen hinzuzufügen, um die Modelle auch bei einer Kostenanalyse nutzen zu können. Bezüglich der Änderungsbedarfsanalyse bei der Kombination von Fähigkeiten wurde geäußert, dass sie auch nützlich sei, da die Konstrukteure meist ein Materialflusssystem als Ausgangspunkt haben (z.B. Rundschalttisch oder Umlaufkette) und ausgehend von diesem Materialflusssystem die Maschine konstruieren müssen. Mithilfe dieser Änderungsbedarfsanalyse könnte also ermittelt werden, welche Stationen vorhanden sind, die fähigkeitstechnisch mit dem Materialflusssystem kompatibel wären. Dies geschah bislang auf Basis von Erfahrungswissen. Seitens des Geschäftsführers gab es jedoch Bedenken bezüglich des Nutzen-Aufwand-Verhältnisses bei der Erstellung der benötigten Modelle. Das Verhältnis wäre seiner Einschätzung nach vermutlich erst für das Unternehmen positiv, wenn die Modelle mehrmals wiederverwendet werden könnten. Die Konstrukteure äußerten, dass ein solches Assistenzsystem für ihre Arbeit sehr hilfreich wäre, um eine erste Einschätzung über die Komplexität einer möglichen Änderung an einer Station zu erhalten. Bezüglich des Erstellungsaufwands der Modelle teilten sie die Meinung des Geschäftsführers,

insbesondere für die Abhängigkeitsmodellierung. Jedoch wurde von den Konstrukteuren auch angemerkt, dass die Modelle ebenfalls als Dokumentationsform für Abhängigkeiten, die bei Änderungsprojekten ermittelt würden, genutzt werden könnten. Hierdurch könnten die Informationen in späteren Änderungsprojekten gut wiederverwendet werden. Auf Basis der Rückmeldungen kann zusammengefasst werden, dass die Methoden durchaus in der Praxis Anwendung finden könnten und nutzenstiftend sind, wobei der Nutzen der Methoden stark von dem Erstellungsaufwand und der Wiederverwendungshäufigkeit der Modelle abhängt.

9.2 Fallstudie 2: Automatisierte Zigarettenmaschine

In der zweiten Fallstudie wurden die entwickelten Methoden an einer automatisierten Zigarettenmaschine eines Herstellers von Maschinen und Anlagen für die Tabakindustrie validiert. Aus Geheimhaltungsgründen können nur begrenzt die Daten der Maschine präsentiert werden. In der Ausgangssituation der Fallstudie forderte ein Kunde des Unternehmens eine Änderung bezüglich des verwendeten Rohmaterials (Zigarettenpapier) an. Die Merkmalausprägungen des neuen Rohmaterials unterschieden sich dabei signifikant von den Merkmalausprägungen des damals aktuell verwendeten Rohmaterials. Dementsprechend musste das Unternehmen analysieren, ob die bestehende Zigarettenmaschine in ihrer damalig aktuellen Auslegung mit dem neuen Material die Zigarette produzieren konnte. Parallel zu den Untersuchungen des Unternehmens wurden die Methoden angewandt. Die Untersuchungen des Unternehmens basierten dabei auf der *Trial&Error*-Methode. Im Vergleich zur ersten Fallstudie war das Ziel hierbei ausschließlich die Untersuchung der Teilprozesse hinsichtlich der Verarbeitbarkeit des neuen Eingangsmaterials sowie zu ermitteln, welche technischen Änderungen in diesem Zusammenhang benötigt wurden.

Analog zur ersten Fallstudie wurde hierbei zunächst der technische Prozess der Maschine auf Basis von Gesprächen mit einem Ingenieur des Unternehmens in der Formalisierten Prozessbeschreibung modelliert. Der technische Prozess bestand insgesamt aus 19 Teilprozessen. Hierbei ist zu beachten, dass ausschließlich Produkte als Eingabe- und Ausgabeobjekte betrachtet wurden, da sich in der Fallstudie nur das Rohmaterial änderte. Um den Modellierungsaufwand auf ein sinnvolles Maß zu beschränken, wurde als nächstes eine Voranalyse mit einem Ingenieur des Unternehmens durchgeführt, in welchem vier Prozesse ausgewählt wurden, die am wahrscheinlichsten von der Materialänderung betroffen waren. Die weiteren Analyseschritte konzentrierten sich ausschließlich auf die vier ausgewählten Teilprozesse *Splicen*, *Beleimen*, *Zusammenführen* und *Einschuss*. Das *Splicen* war ein Teilprozess relativ zu Beginn des Gesamtprozesses und wurde durchgeführt, um neues Zigarettenpapier in das System einzuspeisen, wenn das aktuelle Zigarettenpapier fast aufgebraucht war. Hierbei wurde das einzuführende Papier zunächst auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigt und dann mit dem noch vorhandenen Papier verklebt, zeitgleich wurde das überflüssige beschleunigte Papier abgetrennt. Das Beleimen fand einige Teilprozesse nach dem *Splicen* statt. Im Zuge dessen wurde das Zigarettenpapier erwärmt und beleimt. Im direkt darauffolgenden Teilprozess, dem *Zusammenführen,* wurde das beleimte Zigarettenpapier mit dem Tabakstrang zusammengeführt, wodurch ein Zigarettenstrang geformt wurde. Der Teilprozess *Einschuss* kam einige Prozesse nach der *Zusammenführung*, nachdem der Zigarettenstrang von der Maschine bereits geschnitten wurde. Beim *Einschuss* mussten die Zigaretten mit einem Doppelbeschleuniger auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigt werden, um diese dann in eine Zigarettentrommel zu befördern und einzulagern. Ein Ausschnitt aus dem AML-Fähigkeitsmodell der Zigarettenmaschine mit den vier ausgewählten Teilprozessen ist in Abbildung 9-8 dargestellt.

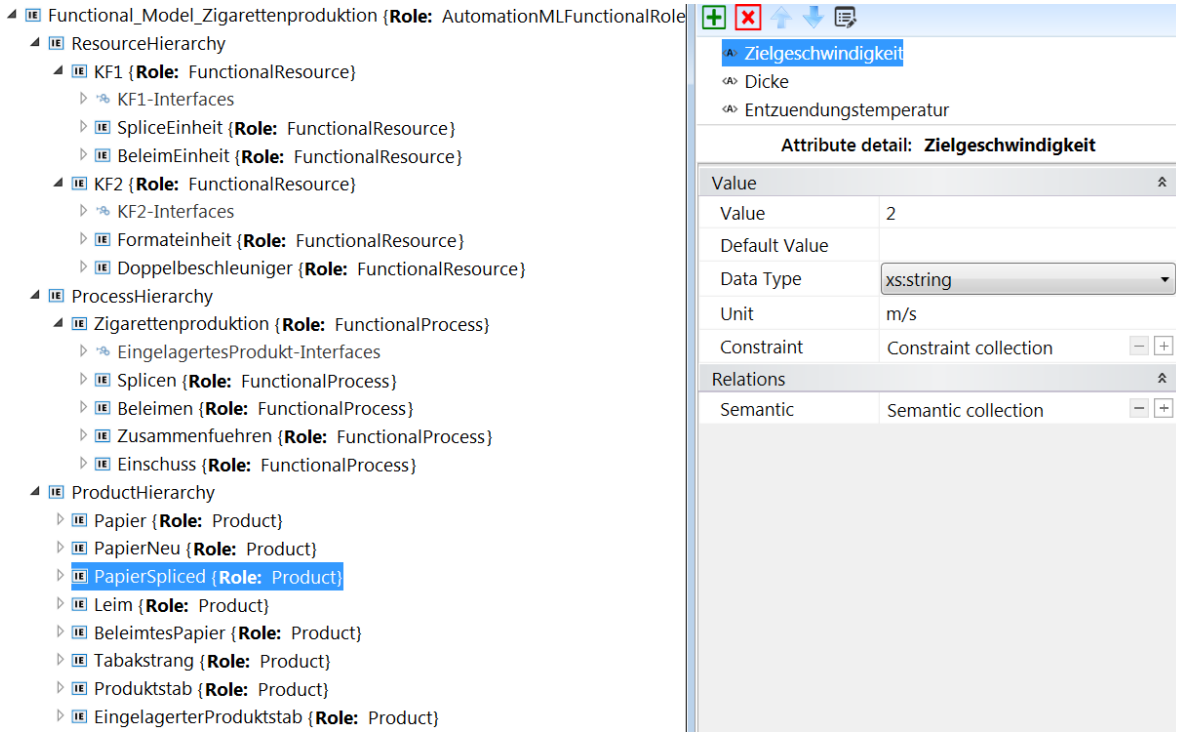

Abbildung 9-8 Ausschnitt des AML-Fähigkeitsmodells der automatisierten Zigarettenmaschine

Wie in der Fallstudie 1 wurden die Objekte im AML-Modell, auf Basis von Interviews mit dem Ingenieur, zusätzlich mit Merkmalen versehen. Aufgrund der angefragten Änderung des Zigarettenpapiers wurden bei den Produktobjekten lediglich Merkmale modelliert, die sich von ihren Ausprägungen her im Vergleich zum vorherigen Produkt geändert hatten. Ausgehend von den geänderten Produktmerkmalen wurde bei jedem der vier Teilfähigkeiten zudem nochmal mit dem Ingenieur analysiert, welche dieser geänderten Produktmerkmale eine Relevanz für den jeweiligen Teilprozess besaßen. Hierfür wurde zunächst untersucht, welche physikalischen Wirkprinzipien im Teilprozess genutzt wurden, z.B. mechanisch, thermisch oder optisch. Anhand dessen konnte die Menge der geänderten Produktmerkmale nochmals auf eine Menge reduziert werden, die für die jeweilige Teilfähigkeit relevant war. Im nächsten Schritt wurden für jede der betrachteten vier Teilfähigkeiten Abhängigkeitsmodelle in Form der MDM mithilfe des Ingenieurs erstellt. Hierbei ist anzumerken, dass auf Basis der vorherigen Eingrenzungen bezüglich der relevanten Merkmale die Abhängigkeitsmodelle eine überschaubare Größe besaßen. Die größte MDM besaß hierbei eine Größe von 23x23 und beschrieb die Abhängigkeiten zwischen den Objekten der Teilfähigkeit *Splicen*. Die Teilfähigkeit *Zusammenführen* besaß hingegen die kleinste MDM mit einer Größe von 11x11. Zudem wurden in dieser Fallstudie die Abhängigkeiten ausschließlich qualitativ modelliert. In Abbildung 9-9, Abbildung C-1, Abbildung C-2 und Abbildung C-3 werden die MDMs der Teilfähigkeiten *Beleimen*, *Einschuss, Zusammenführung* und *Splicen* dargestellt.

Die erstellten Abhängigkeitsmodelle wurden mittels der Softwareapplikation in das definierte XML-Schema überführt und mit dem AML-Fähigkeitsmodell verknüpft. Zusätzlich wurde ebenfalls in dieser Fallstudie ein gefordertes Eingangsprodukt wie in der ersten Fallstudie beschrieben. Die Anfrage beinhaltete die Produktmerkmale Dicke, Zugfestigkeit, Flächengewicht, Entzündungstemperatur sowie Rollreibungswert (siehe Abbildung 9-10). Auf Basis der erstellten Modelle sowie der Beschreibung des geforderten Eingangsprodukts wurde mithilfe der Softwareapplikation eine Änderungsbedarfsanalyse bei der Fertigung neuer bzw. veränderter Produkte durchgeführt, um zu ermitteln, ob die Zigaretten-

maschine in ihrer aktuellen Auslegung das neue Eingangsprodukt verarbeiten konnte. Die Softwareapplikation ermittelte, dass die Zigarettenmaschine das geforderte Eingangsprodukt in ihrer damalig aktuellen Auslegung nicht verarbeiten konnte und generierte diesbezüglich über zehn verschiedene Änderungsmöglichkeiten. Das Ergebnis der Änderungsbedarfsanalyse ist in Abbildung 9-11 abgebildet.

Beleimen	R Heizstab Leistung	R Heizplatte Wärmeleitfähigkeit	R Regler Stellgröße	R Formatbandantrieb Drehzahl	P Beleimen Heiztemperatur	P Beleimen Heizdauer	Prod_I PapierSpliced Wärmeleitfähigkeit	Prod_I PapierSpliced Dicke	Prod_I PapierSpliced Entzuendungstemperatur	Prod_I Leim Mindestfilmbildetemperatur	Prod_I Leim Trockensubstanzanteil
R Heizstab Leistung											
R Heizplatte Wärmeleitfähigkeit											
R Regler Stellgröße											
R Formatbandantrieb Drehzahl											
P Beleimen Heiztemperatur	+	+	+								
P Beleimen Heizdauer				-							
Prod_I PapierSpliced Wärmeleitfähigkeit					>;-	>;-					
Prod_I PapierSpliced Dicke					=;+	=;+					
Prod_I PapierSpliced Entzuendungstemperatur					>;+	>;+					
Prod_I Leim Mindestfilmbildetemperatur					<;+	<;+					
Prod_I Leim Trockensubstanzanteil					>;+	>;+					

Abbildung 9-9 MDM der Teilfähigkeit *Beleimen* der automatisierten Zigarettenmaschine

Eingangsproduktmerkmal	Wert	Einheit	Benötigte Fähigkeit
Dicke	46	micrometer	Zigarettenproduktion
Zugestigkeit	19	Npro15mm	
Flaechengewicht	2	g	
Entzuendungstemperatur	1000	C	
Elastizitaet	niedrig	string	
Rollreibungswert	0.8	md	

Abbildung 9-10 Beschreibung des geforderten Eingangsprodukts der Fallstudie 2

Name	Request Compatibility	Request Issues
190611_Zigarettenmaschine_Zigarettenproduktion_v01+Zigarettenproduktion	Not OK	Dicke: Nicht_erfuellt
		Entzuendungstemperatur: Nicht_erfuellt
		Rollreibungswert: Nicht_erfuellt
		Flaechengewicht: Nicht_erfuellt
		Elastizitaet: Nicht_erfuellt

Abbildung 9-11 Ergebnis Änderungsbedarfsanalyse für das geforderte Eingangsprodukt der Fallstudie 2

Abbildung 9-12 stellt den gesamten generierten Änderungsbaum für die Änderung der Dicke des Papiers für die Teilfähigkeit *Beleimen* dar. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Erhöhung der Dicke des Papiers dazu führte, dass die Heiztemperatur oder die Heizdauer erhöht werden musste.

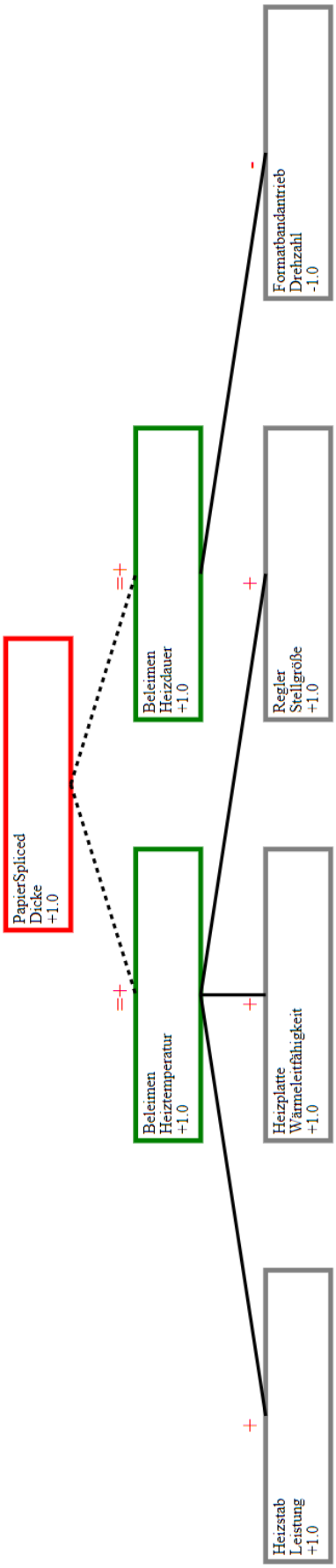

Abbildung 9-12 Gesamter Änderungsbaum der Teilfähigkeit *Beleimen* für Änderung der Papierdicke

Grund hierfür waren die vorhandenen positiven Korrelationsbeziehungen. Hierbei ist anzumerken, dass die abgebildeten Änderungsausprägungen *+1* bzw. *-1* lediglich anzeigen, ob eine Erhöhung bzw. Verringerung des Merkmalwertes benötigt wurde. Dementsprechend beschreiben sie keine konkrete Quantität der Änderungsausprägung. Des Weiteren ist zu sehen, dass die Heiztemperatur des Prozesses durch die Erhöhung der Leistung des Heizstabs, die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Heizplatte oder durch die Erhöhung der Stellgröße des Reglers erreicht werden konnte. Zudem wurde ermittelt, dass die Heizdauer durch die Verringerung der Drehzahl des Formatbandantriebs bewerkstelligt werden konnte. Dementsprechend wurde auf Basis des abgebildeten Änderungsbaums von der Softwareapplikation vier Änderungsmöglichkeiten generiert. Abbildung 9-13 illustriert eine dieser generierten Änderungsmöglichkeiten. Es muss hierbei erwähnt werden, dass auch eine Kombination der generierten Änderungsmöglichkeiten durchgeführt werden konnte, um die geforderte Erhöhung der Eingangsproduktdicke zu erreichen.

Für die Teilfähigkeit *Einschuss* hatte die Softwareapplikation drei verschiedene Änderungsoptionen bezüglich der Erhöhung des Flächengewichts ermittelt. Der dazugehörige gesamte Änderungsbaum ist in Abbildung 9-14 dargestellt. Die Erhöhung des Flächengewichts aufgrund der Nutzung des neuen Papiers konnte dazu führen, dass das zulässige Gewicht des Teilprozesses überschritten werden konnte. Um eine Erhöhung des zulässigen Prozessgewichts zu erreichen, konnten hierbei das Drehmoment des Doppelbeschleunigermotors oder die Übersetzung des Getriebes oder die Radien der Rollen des Doppelbeschleunigers erhöht werden.

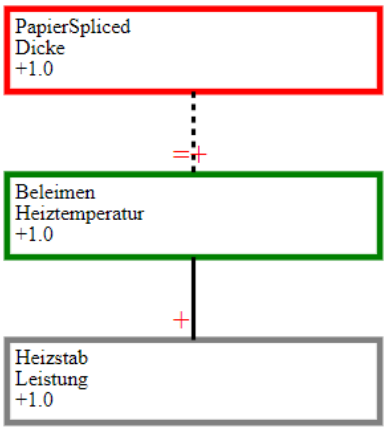

Abbildung 9-13 Änderungsmöglichkeit 1 für die Teilfähigkeit *Beleimen* für Änderung der Papierdicke

Die generierten Änderungsmöglichkeiten wurden von zwei Ingenieuren des Unternehmens begutachtet. Einer der beiden Ingenieure war der Versuchsingenieur, der die parallelen Untersuchungen durchgeführt hatte. Der Versuchsingenieur war nicht an der Erstellung der Modelle beteiligt. Aus Sicht der Ingenieure waren die automatisch generierten Änderungsmöglichkeiten korrekt und gut nachvollziehbar, jedoch wurde hinzugefügt, dass einige von ihnen aufwendig und daher nicht die besten Optionen wären. Im Interview gaben die Ingenieure zu Protokoll, dass der zeitliche Aufwand für die Erstellung der Abhängigkeitsmodelle ihres Empfindens nach im Vergleich zum Standardvorgehen des Unternehmens relativ hoch sei, wenn die Abhängigkeitsmodelle nicht wiederverwendet werden könnten. Die Erstellungszeit einer MDM variierte hierbei je nach Komplexität des Prozesses zwischen vier und acht Stunden inklusive Eingrenzung der Merkmale, obwohl in dieser Fallstudie die Größen der MDMs überschaubar waren. Der Aufwand für die Erstellung der Prozessbeschreibung und der Fähigkeitsmodelle war hierbei verhältnismäßig gering.

Jedoch haben die Ingenieure ausgesagt, dass sie das systematische Vorgehen bei der Erstellung der Modelle als effektive Unterstützung hinsichtlich der Problemfindung ansahen, da man dadurch die Probleme in Teilprobleme zerlegen und fokussierter bearbeiten konnte. Die Ingenieure merkten auch an, dass der Ansatz mehr Änderungsoptionen hervorbrachte, als sie in Betracht gezogen hätten. Darüber hinaus war die Softwareapplikation auch in der Lage, die in der Realität implementierte Änderung hinsichtlich des erhöhten Flächengewichts bezogen auf den Teilprozess *Einschuss* aufzuführen, welche

der zweiten Änderungsmöglichkeit entsprach und die Erhöhung der Übersetzung des Getriebes beinhaltete. Diese Möglichkeit wurde von den Versuchsingenieuren umgesetzt, da die Änderung der Übersetzung des Doppelbeschleunigergetriebes durch eine einfache Parametrierung der Software erfolgen konnte und dementsprechend mit dem geringsten Aufwand und den geringsten Kosten verbunden war. Die Ingenieure bewerteten die Methoden als nutzenstiftend für die technische Änderungsanalyse, insbesondere um eine Abschätzung der Änderungskomplexität sowie erste Änderungsmöglichkeiten zu erhalten. Jedoch wurde auch hierbei angemerkt, dass ein positives Aufwand-Nutzen-Verhältnis durch eine automatische Generierung der Modelle oder Wiederverwendung der Modelle gewährleistet sein sollte, damit die Anwendung der Methoden auch aus wirtschaftlicher Sicht für das Unternehmen Sinn ergibt.

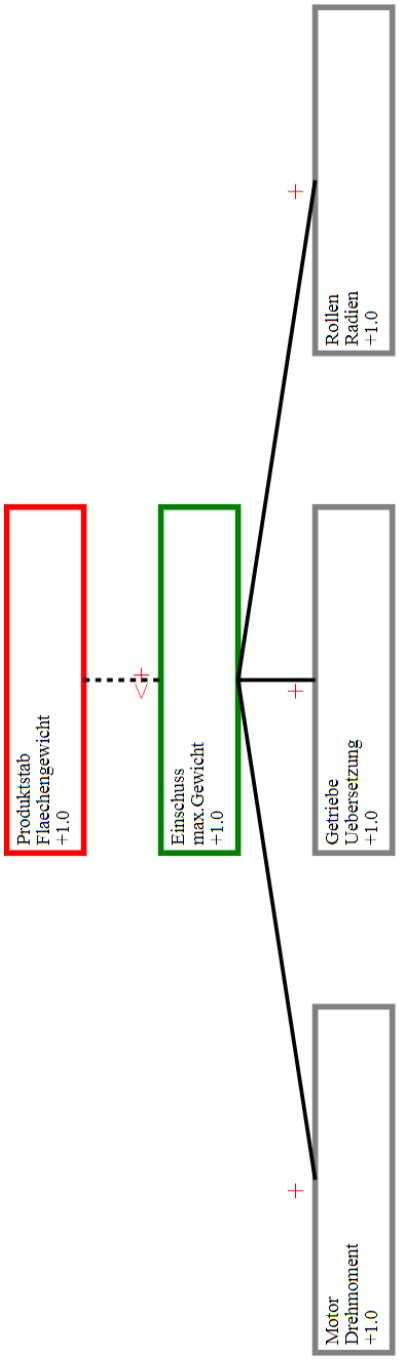

Abbildung 9-14 Gesamter Änderungsbaum der Teilfähigkeit *Einschuss* für Änderung des Flächengewichts

Im Vergleich zur ersten Fallstudie lag hier der Fokus nicht auf der Kompatibilitätsprüfung von vorhandenen Baugruppen, sondern ausschließlich auf der Erfüllbarkeitsüberprüfung von Produktanforderungen und der Generierung von Änderungsmöglichkeiten. Außerdem konnte gezeigt werden, dass im Vergleich zum sonstigen Vorgehen des Unternehmens, welches primär auf Gesprächsrunden, Erfahrungswissen und Experimenten basierte, auf Basis der Methoden ein systematischeres Vorgehen genutzt werden konnte. Hierdurch konnten systematisch gezielte Analysen bei einer gegebenen Änderungsanfrage durchgeführt werden, in dem die Ingenieure das Problem in kleinere Teilprobleme zerlegt haben, wodurch die Komplexität des Gesamtproblems reduziert wurde.

9.3 Fallstudie 3: Automatisiertes Nietsystem

In der dritten Fallstudie wurden die Methoden an einem automatisierten Nietsystem, welches für die Luftfahrtindustrie entwickelt wurde, validiert. Das Nietsystem wurde in der Strukturmontage eingesetzt, wo es die Rumpfsegmente von Flugzeugen mittels Schraubnietverbindungen zusammenfügte. Hierbei schraubte das Nietsystem automatisiert die Collare/Nietmuttern (*Hi-Loks*) auf die Niete. In der Grundausstattung bestand das Nietsystem zum Zeitpunkt der Fallstudie aus einem Roboterarm (*UR10*), der auf einer mobilen Plattform montiert war, sowie einem Endeffektor, der mit einem Nietmutterzuführsystem ausgestattet und am Roboterarm befestigt war. Hinsichtlich des Endeffektors standen ein pneumatisch betriebenes Gerät sowie ein elektrisch betriebenes Gerät zur Auswahl. Abbildung 9-15 bildet das automatisierte Nietsystem ab. Der Prozessablauf des Nietsystems in seiner Grundkonfiguration war wie folgt: Im Nietsystem waren die Posen der Nieten (im weiteren Verlauf auch Zielposen genannt) relativ zu einer festgelegten Startposition vordefiniert. Eine Pose bestand hierbei aus x-, y, z-Koordinaten sowie drei Rotationswinkeln. Der technische Prozess begann durch die Übermittlung eines Startsignals, worauf der Roboterarm die Endeffektoreinheit zu den definierten Zielposen bewegte. An jeder Zielpose wurde der Endeffektor aktiviert und vernietete eine Hi-Lok-Niete durch das Aufschrauben der Nietmutter. Der Prozessablauf der Grundkonfiguration war jedoch recht fehleranfällig gegenüber Abweichungen zwischen den realen Nietposen und den vorprogrammierten Zielposen. Aus diesem Grund sollte eine neue Konfiguration des Nietsystems erstellt werden, in der das System mit einem Lichtsensorsystem ausgestattet wurde und die Nietpositionen automatisiert bestimmen konnte. Für die neue Konfiguration standen zwei triangulationsbasierte Lichtsensorsysteme zur Verfügung, die die Pose bestimmter Objekte erkennen konnten.

Abbildung 9-15 Automatisiertes Nietsystem

Das Ziel der Fallstudie war es, mittels des entwickelten Ansatzes zu ermitteln, welches der beiden Lichtsensorsysteme für die neue Konfiguration genutzt werden konnte und ob die Konfiguration geforderte Collare (Nietmuttern) verschrauben konnte. Zusätzlich sollte ermittelt werden welche technischen Änderungsmöglichkeiten vorhanden waren, um das Nietsystem zu ändern, wenn die geforderte Collare nicht verschraubt werden konnten. Um die Ziele zu erreichen, wurden die Fähigkeiten des Roboterarms, der beiden Endeffektoren sowie der beiden Sensorsysteme nach dem entwickelten Modellierungskonzept in AML beschrieben. Die Erstellung der Fähigkeitsmodelle geschah dabei auf Basis von

Interviews mit einem Entwicklerteam des Nietsystems, bestehend aus drei Ingenieuren. Abbildung 9-16 zeigt das AML-Fähigkeitsmodel des *Micro-Epsilon-Sensorsystems*. In der Abbildung ist zu erkennen, dass das Sensorsystem zwei verschiedene *Detection*-Fähigkeiten besaß und dass die *Detection*-Fähigkeit wiederum aus drei Teilfähigkeiten bestand. Der Unterschied der beiden *Detection*-Fähigkeiten bestand lediglich darin, dass in der ersten Fähigkeit die Teilfähigkeit *CircleFit* genutzt wurde, wodurch nur kreisförmige Objekte erkannt werden. In der zweiten *Detection*-Fähigkeit hingegen wurde die Teilfähigkeit *CylinderFit* genutzt, wodurch auch zylindrische Objekte erkannt werden konnten. Die beiden Teilfähigkeiten wurden von sog. Software-Containern ausgeführt, die bei der Konfiguration des Sensorsystems flexibel heruntergeladen werden konnten. In der Fallstudie wurden ebenfalls Fähigkeitsmodelle für die Teilfähigkeiten erstellt. Das Fähigkeitsmodell des zweiten *VMT-Sensorsystems* besaß lediglich eine *Detection*-Fähigkeit. Die Fähigkeit war jedoch identisch mit der ersten *Detection*-Fähigkeit des *Micro-Epsilon-Sensorsystems* und unterschied sich nur in den Merkmalausprägungen der Informationsobjekte. Abbildung D-1 und Abbildung D-2 illustrieren das Fähigkeitsmodell des Roboterarms und des elektrischen Endeffektors. Bezüglich des Roboterarms ist anzumerken, dass der Roboterarm zwei verschiedene *Moving*-Fähigkeiten besaß. Die erste Fähigkeit wurde von den Entwicklern eingefügt mit Hinblick auf die Konfiguration des Nietsystems mit einem Sensorsystem. Diese Fähigkeit gab während des Bewegungsprozess die Pose des sog. *ToolCenterPoints* des Roboterarms aus, wohingegen die zweite *MovingRivet*-Fähigkeit diese Posen nicht ausgeben konnte, da diese Fähigkeit ausschließlich für die Bewegung zu den Nieten zuständig war.

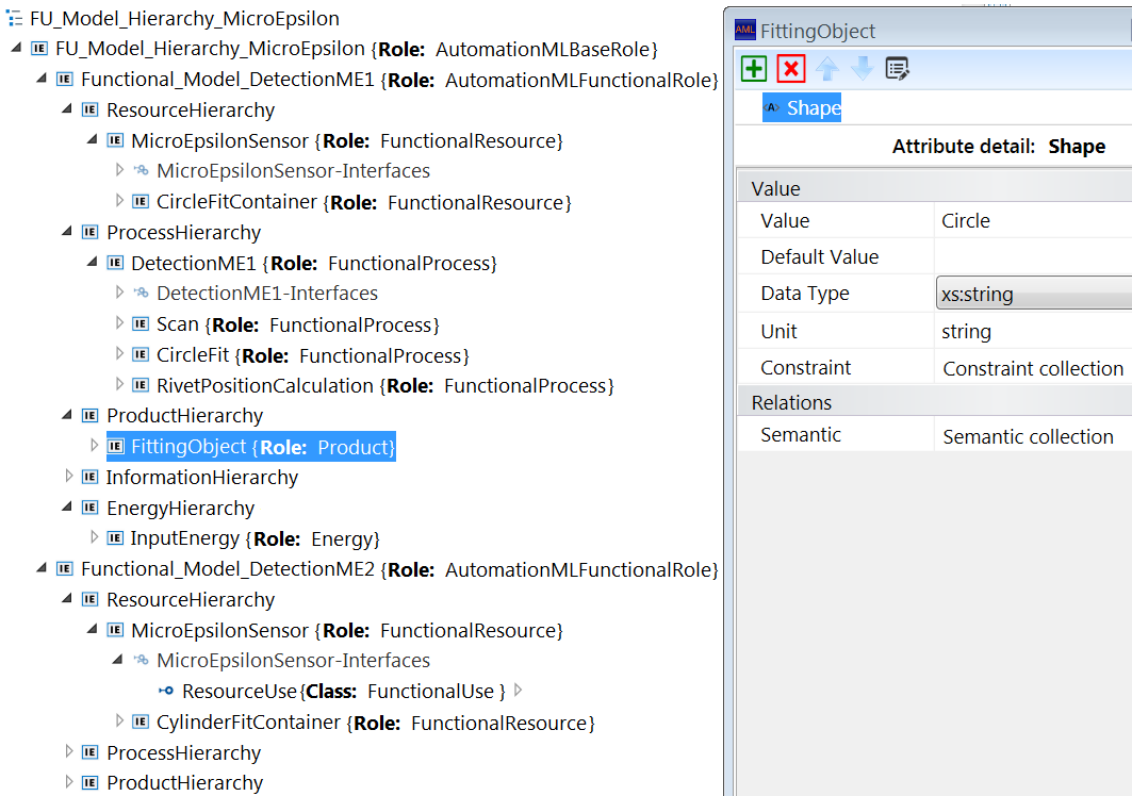

Abbildung 9-16 Ausschnitt des Fähigkeitsmodells des Mirco-Epsilon-Sensorsystems

Auf Basis von Interviews mit dem Entwicklerteam wurden ebenfalls die Abhängigkeitsmodelle erstellt. Da die meisten Komponenten des Nietsystems nicht vom Unternehmen selbst hergestellt, sondern eingekauft wurden, gab es nicht viele Informationen bezüglich der Abhängigkeiten innerhalb der Teil-

systeme. Dementsprechend wurden lediglich die Abhängigkeiten modelliert, die aus den Spezifikationen der Teilsysteme bekannt oder ersichtlich waren. Es wurden sechs MDMs erstellt, jeweils eine für die beiden Endeffektoren sowie jeweils eine MDM für die Teilfähigkeiten der beiden Sensorsysteme. Für den Roboterarm wurde keine MDM erstellt, da eine Änderung des Roboterarms nicht betrachtet werden sollte. Die größte MDM besaß hierbei eine Dimension von 22x22 und beschrieb die Objektabhängigkeiten der Fähigkeit des pneumatischen Endeffektors. Die Abhängigkeiten wurden in dieser Fallstudie ebenfalls nur qualitativ beschrieben. Abbildung 9-17 und Abbildung D-3 visualisieren die Abhängigkeitsmodelle der beiden Endeffektoren. Die MDMs der Sensorsysteme besaßen lediglich eine Größe zwischen 7x7 bis 13x13. Abbildung D-4 zeigt beispielsweise die MDM der Teilfähigkeit *Scan* des *Micro-Epsilon-Sensorsystems.*

Screwing	R PneumaticalEndeffector maxTorque	R PneumaticalEndeffector OperationPressure	R ValveTerminal OutputPressure	R Attachment Width	R Attachment Height	R Attachment Length	R Attachment Shape	P Screwing feasibleCollarType	P Screwing feasibleWidth	P Screwing feasibleHeigth	P Screwing feasibleLength	P Screwing feasibleTorque	Prod_I RotatingObject CollarType	Prod_I RotatingObject Width	Prod_I RotatingObject Heigth	Prod_I RotatingObject Length	Prod_O RotatedObject Torque	Prod_O RotatedObject CollarType	Prod_O RotatedObject Width	Prod_O RotatedObject Heigth	Prod_O RotatedObject Length
R PneumaticalEndeffector maxTorque																					
R PneumaticalEndeffector OperationPressure	<;+		=;+																		
R ValveTerminal OutputPressure																					
R Attachment Width																					
R Attachment Height																					
R Attachment Length																					
R Attachment Shape																					
P Screwing feasibleCollarType							0														
P Screwing feasibleWidth				+																	
P Screwing feasibleHeigth					+																
P Screwing feasibleLength						+															
P Screwing feasibleTorque		+																			
Prod_I RotatingObject CollarType								=;0													
Prod_I RotatingObject Width									=;+												
Prod_I RotatingObject Heigth										=;+											
Prod_I RotatingObject Length											=;+										
Prod_O RotatedObject Torque												+									
Prod_O RotatedObject CollarType								0													
Prod_O RotatedObject Width									+												
Prod_O RotatedObject Heigth										+											
Prod_O RotatedObject Length											+										

Abbildung 9-17 Abhängigkeitsmodell des pneumatischen Endeffektors

Wie bereits in beiden vorangegangen Fallstudien wurde auch hier eine Anfrage in Form von Merkmalen eines geforderten Produkts beschrieben. Abbildung 9-18 zeigt die Beschreibung des geforderten Produkts. In der Abbildung ist zu erkennen, dass im Unterschied zu den anderen Fallstudien ein Ausgangsproduktmerkmal gefordert wurde. Hierbei wurde das Merkmal *Torque* gefordert, welches das Drehmoment der aufgeschraubten Nietmutter beschreibt. Die erstellten Modelle und die beschriebene Anforderung wurden genutzt, um mittels der Softwareapplikation eine Änderungsbedarfsanalyse bei der Kombination von Fertigungsfähigkeiten und eine Änderungsbedarfsanalyse bei der Fertigung neuer bzw. veränderter Produkte durchzuführen.

Eingangsproduktmerkmale	Wert	Einheit	Benötigte Fähigkeit
Shape	Cylinder	string	Moving
Weight	10	kg	Detection
Width	30	mm	Moving
CollarType	Hi-Lok	string	Screwing
zDistance	80	mm	
Ausgangsproduktmerkmale			
Torque	3	Nm	

Abbildung 9-18 Beschreibung des geforderten Produkts der Fallstudie 3

Für die gestellte Anfrage konnte die Softwareapplikation 24 Kombinationen von Fähigkeiten ermitteln. Die Hälfte der Kombinationen wurde als Kombinationen, die ohne technische Änderungen von Merkmalausprägungen miteinander kombinierbar wären, wenn gewisse Eingangsobjekte der nachgelagerten Fähigkeit von einer weiteren Fähigkeit bereitgestellt würden, eingestuft. Die andere Hälfte der Kombinationen benötigte zudem technische Änderungen hinsichtlich der Merkmalausprägungen, um miteinander kombinierbar zu sein. Abbildung 9-20 zeigt ein Analyseergebnis für die gestellte Anforderung. Die Fähigkeiten im Analyseergebnis sind nicht ohne Änderung der Merkmalausprägungen miteinander kombinierbar. Hierbei ist zu erkennen, dass die Fähigkeit *MovingScan* nicht mit der vorgelagerten Fähigkeit *Detection* kombinierbar war.

Name	Upstream Compatibility	Request Compatibility	Request Issues
280610_UR10_Moving_v01+MovingScan-1		Not OK	Shape: Nicht_erfuellt
240619_VMT_Detection_v02+DetectionVMT(Detection)	Partly OK	Not OK	Width: Nicht_erfuellt
280610_UR10_Moving_v01+MovingScan(Moving)	Not OK	Not OK	zDistance: Nicht_erfuellt
190619_PneumaticalEndeffector_Screwing_v01+PneumaticScrewing(Screwing)	Partly OK	Not OK	Weight: Nicht_erfuellt
			Torque: Nicht_erfuellt

Abbildung 9-19 Ein Ergebnis der Änderungsbedarfsanalyse für die gestellte Anforderung aus Abbildung 9-18 in der Fallstudie 3

Abbildung 9-20 zeigt das Analyseergebnis der Kombination dieser beiden Fähigkeiten. Hierbei ist zu erkennen, dass der Grund für die benötigte Merkmaländerung das Merkmal *Vorschubgeschwindigkeit* des Informationsobjektes *vAufschraub* war, da die ausgegebene Information für die Vorschubgeschwindigkeit „2“ betrug und die nachgelagerte Fähigkeit diesbezüglich eine Eingabe von „0“ benötigte, da die Fähigkeit *MovingRivet* keinen Vorschub ausüben sollte. In Abbildung 9-20 ist zudem ersichtlich, dass die vorgelagerte Fähigkeit lediglich eine Ausgabepose besaß, jedoch die nachgelagerte Fähigkeit zwei verschiedene Eingangsposen benötigte. Beim Abgleich der Informationsobjekte wurde die Ausgangspose mit beiden benötigten Posen abgeglichen. Da beide Eingangsposen die gleichen Merkmale besaßen wie die Ausgangspose, wurde beim Abgleich eine Übereinstimmung ermittelt. Jedoch sollte die Ausgangspose der vorgelagerten Fähigkeit nur als *InputPose* genutzt werden und nicht als *ToolCenterPoint*, da letzteres semantisch eine andere Pose beschreibt. Diese semantische Unterscheidung wurde nicht beim Abgleich getroffen, was zu einem inkorrekten Abgleichergebnis führte. Um dieses Problem zu lösen, müssten die Merkmale der beiden Posen semantisch eindeutig beschrieben werden. Eine ermittelte Kombination, die ohne Änderung von Merkmalausprägungen auskam, ist in Abbildung 9-21 dargestellt.

Keine der ermittelten Kombinationen konnte die gestellte Anfrage erfüllen. Dies lag unter anderem daran, dass das geforderte Gewicht des Eingangsprodukts nicht für den Roboterarm zulässig war. Hierbei ist anzumerken, dass das beschriebene Gewicht nicht nur das Gewicht der Collare darstellte, sondern das Gewicht der Endeffektoreinheit einschließlich des Sensorsystems. Außerdem konnte weder der elektrische noch der pneumatische Endeffektor das gewünschte Drehmoment aufbringen. Da mindestens eines dieser Teilsysteme genutzt werden musste, konnte keine der Kombinationen die gestellte Anfrage erfüllen. Des Weiteren ist anhand der Abbildung 9-19 und Abbildung 9-21 zu erkennen, dass die Kombination mit dem *VMT-Sensorsystem* beispielsweise nicht die geforderte Objektform (*Shape*) verarbeiten konnte, wohingegen das *Micro-Epsilon-Sensorsystem* mit seiner zweiten Fähigkeit *Detection* dazu in der Lage war.

Initial Capability		Subsequent Capability		280610_UR10_Moving_v01+MovingScan(Moving)		Overall Matching Result				
DetectionVMT(Detection)	Checked Output Element	Parameter	Required Value	Checked Input Element	Parameter	Assurance Value	Matching Value	Result
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	rx	0-360	(class fpbElements.Information) ToolCenterPoint	rx	0-360	0.0-360.0	OK
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	ry	0-360	(class fpbElements.Information) ToolCenterPoint	ry	0-360	0.0-360.0	OK
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	rz	0-360	(class fpbElements.Information) ToolCenterPoint	rz	0-360	0.0-360.0	OK
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	x	300-1100	(class fpbElements.Information) ToolCenterPoint	x	300-1100	300.0-1100.0	OK
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	y	300-1100	(class fpbElements.Information) ToolCenterPoint	y	300-1100	300.0-1100.0	OK
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	z	300-1100	(class fpbElements.Information) ToolCenterPoint	z	300-1100	300.0-1100.0	OK
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	rx	0-360	(class fpbElements.Information) InputPose	rx	0-360	0.0-360.0	OK
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	ry	0-360	(class fpbElements.Information) InputPose	ry	0-360	0.0-360.0	OK
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	rz	0-360	(class fpbElements.Information) InputPose	rz	0-360	0.0-360.0	OK
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	x	300-1100	(class fpbElements.Information) InputPose	x	300-1100	300.0-1100.0	OK
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	y	300-1100	(class fpbElements.Information) InputPose	y	300-1100	300.0-1100.0	OK
	(class fpbElements.Information) RivetPosition	z	300-1100	(class fpbElements.Information) InputPose	z	300-1100	300.0-1100.0	OK
	(class fpbElements.Information) vAufschraub	Vorschubgeschwindigkeit	2	(class fpbElements.Information) VAufschraub	Vorschubgeschwindigkeit	0		Nicht_erfuellt
	(class fpbElements.Product) dummy	Weight		(class fpbElements.Product) MovingObject	Weight	0-5		Nicht_relevant
	(class fpbElements.Product) dummy	Voltage		(class fpbElements.Energy) InputEnergy	Voltage	100-240		Nicht_relevant

Abbildung 9-20 Änderungsbedarfsanalyse der Kombination der Fähigkeiten des *VMT-Sensorsystems und* der Fähigkeit *MovingScan* des Roboterarms

Name	Upstream Compatibility	Request Compatibility	Request Issues
280610_UR10_Moving_v01+MovingScan-1		Not OK	Weight: Nicht_erfuellt
240619_MicroEpsilon_Detection_v01+DetectionME2(Detection)	Partly OK	OK	Width: Nicht_erfuellt
280610_UR10_Moving_v01+MovingRivet(Moving)	Partly OK	Not OK	Torque: Nicht_erfuellt
180619_ElectricalEndeffector_Screwing_v01+ElectricalScrewing(Screwing)	Partly OK	Not OK	

Abbildung 9-21 Weiteres Ergebnis der Änderungsbedarfsanalyse für die gestellte Anforderung aus Abbildung 9-18 in der Fallstudie 3

In Abbildung 9-22 ist der Änderungsbaum der Teilfähigkeit *Screwing* des pneumatischen Endeffektors für die Erhöhung des Drehmoments abgebildet. Der Änderungsbaum repräsentiert hierbei gleichzeitig die Änderungsmöglichkeit. In Abbildung 9-23 ist der Änderungsbaum des elektrischen Endeffektors, welcher ebenfalls die Änderungsmöglichkeit repräsentiert, für die gleiche Änderung abgebildet. Vergleicht man die beiden Änderungsmöglichkeiten, so ist ersichtlich, dass die Änderung des elektrischen Endeffektors potentiell weniger Merkmaländerungen benötigte, da die geforderte Änderung des Drehmoments durch die Erhöhung der Variable *TorqueVariable* erreicht werden konnte, welches durch das maximale Drehmoment des Endeffektors beschränkt wurde. Für die Erhöhung des geforderten Drehmoments des pneumatischen Endeffektors hingegen musste der Betriebsdruck (*OperationPressure*) erhöht werden, welcher durch den Ausgangsdruck (*OutputPressure*) der Ventilinsel und das maximale Drehmoment des pneumatischen Endeffektors beschränkt war.

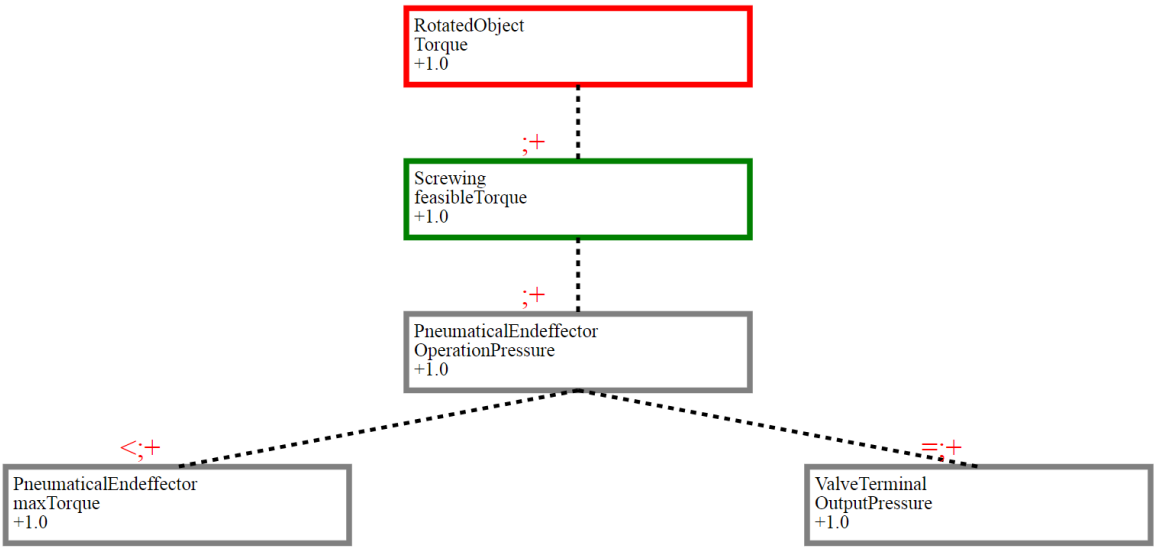

Abbildung 9-22 Änderungsbaum der Teilfähigkeit *Screwing* des pneumatischen Endeffektors für die Erhöhung des Drehmoments

Da die Software der Sensoreinheit in dieser Fallstudie durch die Containerstruktur gut rekonfigurierbar war, wurden die Teilfähigkeitsmodelle der Sensorsysteme genutzt, um zu analysieren, ob das *VMT-Sensorsystem* durch eine Änderung des genutzten Software-Containers die geforderte Objektform verarbeiten konnte. Die Analyseergebnisse sind in Abbildung 9-24 dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die komponierte Fähigkeit des Sensorsystems entweder durch die Nutzung der *Cylinder-Fit*-Fähigkeit oder durch die Nutzung der *CircleFit*-Fähigkeit erstellt werden konnte. Hierbei konnte

durch die Nutzung der erstgenannten Fähigkeit die angefragte Objektform erkannt werden (siehe Abbildung 9-24 oben), wohingegen durch die Nutzung der *CircleFit*-Fähigkeit die angefragte Objektform nicht erkannt werden konnte (siehe Abbildung 9-24 unten).

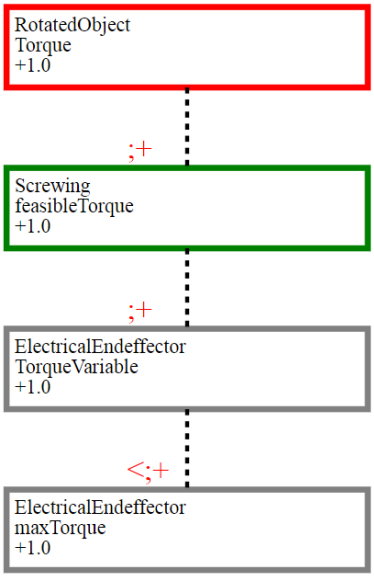

Abbildung 9-23 Änderungsbaum der Teilfähigkeit *Screwing* des elektrischen Endeffektors für die Erhöhung des Drehmoments

Name	Upstream Compatibility	Request Compatibility	Request Issues
240619_VMT_Scan_v01+ScanVMT-2		OK	
240619_CylinderFitContainer_Fitting_v01+CylinderFit(Fitting)	Not OK	OK	
240619_RivetDigitalizationContainer_PositionCalculation_v01+PositionCalculation(PositionCalculation)	OK	OK	

Name	Upstream Compatibility	Request Compatibility	Request Issues
240619_VMT_Scan_v01+ScanVMT-2		OK	Shape: Nicht_erfuellt
240619_CircleFitContainer_Fitting_v01+CircleFit(Fitting)	Partly OK	Not OK	
240619_RivetDigitalizationContainer_PositionCalculation_v01+PositionCalculation(PositionCalculation)	OK	OK	

Abbildung 9-24 Ergebnisse der Änderungsanalyse des *VMT-Sensorsystems*

Es in der Abbildung ebenfalls zu erkennen, dass die Nutzung der *CylinderFit*-Fähigkeit in Zusammenhang mit dem *VMT-Sensorsystem* nicht ohne Merkmaländerung möglich war. Grund hierfür war, dass die Fähigkeit *Scan* des *VMT-Sensorsystems* eine zu niedrige Auflösung der geclusterten Punktewolke ausgab, die nicht von der nachgelagerten Fähigkeit *CylinderFit* verarbeitet werden konnte (Abbildung 9-25 Merkmal *resolution*).

Initial Capability	ScanVMT(Scan)	**Subsequent Capability**	240619_CylinderFitContainer_Fitting_v01+CylinderFit(Fitting)	**Overall Matching Result**	Not OK		
Checked Output Element	**Parameter**	**Required Value**	**Checked Input Element**	**Parameter**	**Assurance Value**	**Matching Value**	**Result**
(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	rx	0-360	(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	rx	0-360	0.0-360.0	OK
(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	ry	0-360	(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	ry	0-360	0.0-360.0	OK
(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	rz	0-360	(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	rz	0-360	0.0-360.0	OK
(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	x	300-1100	(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	x	300-1100	300.0-1100.0	OK
(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	y	300-1100	(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	y	300-1100	300.0-1100.0	OK
(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	z	300-1100	(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	z	300-1100	300.0-1100.0	OK
(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	resolution	50-80	(class fpbElements.Information) ClusteredPoints	resolution	100-200		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) dummy	Shape		(class fpbElements.Product) FittingObject	Shape	Circle;Cylinder		Nicht_relevant
(class fpbElements.Product) dummy	zDistance		(class fpbElements.Product) FittingObject	zDistance	70-120		Nicht_relevant
(class fpbElements.Product) dummy	Width		(class fpbElements.Product) FittingObject	Width	42-58		Nicht_relevant

Abbildung 9-25 Ergebnis der Änderungsanalyse der Kombination der Fähigkeit *Scan* des *VMT-Sensorsystems* und der Fähigkeit *CylinderFit*

Die generierten Analyseergebnisse wurden von einem erweiterten Personenkreis des Entwicklungsteams begutachtet. Der Personenkreis beinhaltete dabei den Projektleiter des Entwicklungsteams sowie weitere Ingenieure, die parallel an einer zweiten Version des Nietsystems arbeiteten und nicht an der Erstellung der Modelle beteiligt waren. Die generierten Ergebnisse wurden, in Bezug auf die modellierten Informationen in den Modellen, als größtenteils korrekt bewertet. Einzige Ausnahme bildete dabei das Problem bezüglich des semantisch korrekten Abgleichs der Fähigkeitsmodelle. Die generierten Änderungsmöglichkeiten wurden ebenfalls als korrekt eingestuft. Im Interview gaben die Experten zu Protokoll, dass die Anwendung der Methoden definitiv einen positiven Nutzen erzeugt, insbesondere für einen schnellen Abgleich von einfachen Merkmalen, wodurch eine schnelle erste Prüfung der Kombinationen der Systemfähigkeiten hinsichtlich einer Anfrage stattfinden könnte. Jedoch wurde angemerkt, dass aus Sicht der Experten für die Analyse von komplexeren Geometrien auf CAD-Daten zurückgegriffen werden und diese nicht auf Basis einer Merkmalbeschreibung erfolgen sollte. Des Weiteren äußerten die Experten, dass der Aufwand für die Erstellung der Modelle zur einmaligen Nutzung relativ hoch wäre, jedoch empfanden die Entwicklungsingenieure, die an der Erstellung der Modelle beteiligt waren, den Aufwand als überschaubar. Letzteres lag vermutlich daran, dass die Abhängigkeitsmodelle in dieser Fallstudie recht klein und einfach waren. Die Erstellung der Fähigkeitsmodelle konnte, wie in den anderen Fallstudien, innerhalb von wenigen Stunden mit entsprechender Vorbereitung durchgeführt werden. Bezüglich der Abhängigkeitsmodelle äußerten die Experten, dass sie tendenziell ein solches Modell gut fänden, da dadurch das verteilte Wissen von Domänenexperten gesammelt und ausgelesen werden könnte. Es wurde jedoch auch angemerkt, dass es in diesem Fall ebenfalls sinnvoll gewesen wäre, Abhängigkeiten zwischen den Teilsystemen zu modellieren, da diese Abhängigkeiten für die Erstellung der Konfiguration wichtig wären. Hinsichtlich des Fähigkeitsmodells wurde angemerkt, dass es nützlich wäre, weitere Informationen in das Modell zu integrieren, wie beispielsweise wirtschaftliche Faktoren oder Wartungsinformationen, damit die Fähigkeitsmodelle auch für andere Analysen genutzt werden könnten. Die Beschreibung der Fähigkeiten als Eingangs- und Ausgangsgrößen des Prozesses fanden die Entwicklungsingenieure sehr gut, da sie ebenfalls bei der Integration

der Teilsysteme zunächst die Eingangs- und Ausgangsgrößen definierten, jedoch unsystematisch. Abschließend schlugen die Experten eine Tool-Unterstützung für die Erstellung der Modelle vor, um die Praktikabilität der Methoden zu steigern.

Die dritte Fallstudie demonstrierte, dass die Methoden bis zu einem gewissen Grad ebenfalls nutzenstiftend auf ein automatisiertes System angewandt werden können, welches für einen Fügeprozess in der Luftfahrt verwendet wurde. Im Vergleich zu den ersten beiden Fallstudien lag der Fokus hierbei jedoch primär auf der Kompatibilitätsprüfung von vorhandenen Teilsystemen. In der Fallstudie wurde gezeigt, dass die Methoden verschiedenste Kombinationen von Fähigkeiten anhand einer formulierten Anfrage ermitteln und deren Kompatibilität anhand der beschriebenen Informationsmodelle größtenteils korrekt analysieren können. Des Weiteren wurde hierbei demonstriert, dass die Änderungsbedarfsanalyse bei der Kombination von Fertigungsfähigkeiten ebenfalls auf verschiedenen Dekompositionsstufen anwendbar ist.

10 Kritische Beurteilung der entwickelten Modelle und Methoden

Im vorherigen Kapitel wurden die grundlegende Anwendbarkeit und Nützlichkeit der entwickelten Modelle und Methoden anhand der durchgeführten Fallstudien aufgezeigt. In diesem Kapitel werden die erstellten Modelle und Methoden kritisch bewertet. Hierbei werden die gestellten Anforderungen aus Unterkapitel 2.5 herangezogen, um zu bewerten, ob mit den Modellen und den dazugehörigen Methoden die deklarierten Teilziele und Teilforschungsfragen aus Unterkapitel 2.4 erreicht bzw. beantwortet werden. In diesem Zusammenhang werden auf Basis theoretischer Überlegungen und der erzielten Erkenntnisse der durchgeführten Fallstudien ebenfalls die Vorteile, Nachteile und Grenzen der erzielten Ergebnisse diskutiert.

Anhand der Fallstudien wurde gezeigt, dass das erstellte Fähigkeitsmodell mit der dazu entwickelten Methode erfolgreich dafür genutzt werden kann, um die Erfüllbarkeit von Fertigungsanforderungen systematisch zu analysieren und bei einer Nichterfüllbarkeit der Anforderungen den Änderungsbedarf in Form von Merkmaländerungen zu beschreiben. Darüber hinaus konnten anhand des Fähigkeitsmodells auch Änderungsbedarfe ermittelt werden, die tiefgreifendere technische Änderungen benötigten und über Änderungen von Merkmalausprägungen hinausgingen. Dementsprechend erfüllt das Fähigkeitsmodell die gestellte Anforderung 1. Außerdem basiert die Fähigkeitsmodellierung auf der Beschreibung von Eingangs- und Ausgangsobjekten des technischen Prozesses, wodurch es kompatibel mit einer produktorientieren Fertigungsanforderungsbeschreibung ist. Folglich erfüllt das Fähigkeitsmodell auch Anforderung 2. Des Weiteren wird das Fähigkeitsmodell in AML, einem offenem XML-basierten Datenaustauschformat, abgebildet, wodurch eine gute Maschineninterpretierbarkeit gewährleistet ist. Dies konnte ebenfalls anhand der implementierten Softwareapplikation, die automatisiert das Fähigkeitsmodell auslesen kann, aufgezeigt werden. Folglich erfüllt das Fähigkeitsmodell ebenfalls die gestellte Anforderung 5. Darüber hinaus konnte mittels der *Interfaces* in AML das Fähigkeitsmodell systematisch und maschineninterpretierbar mit dem Abhängigkeitsmodell, welches im XML-Format vorliegt, verknüpft werden. Daher erfüllt das Fähigkeitsmodell die gestellte Anforderung 6, wodurch es alle gestellten Anforderungen an ein Fähigkeitsmodell in der vorliegenden Arbeit (siehe Unterkapitel 2.5) erfüllt.

Da die Fertigungsfähigkeiten im Modell auf Basis von möglichen Eingangs- und Ausgangsobjektmerkmalen beschrieben werden, geschieht die Analyse hierbei durch einen simplen und schnelldurchführbaren Abgleich von Produkt-, Informations- und/oder Energieobjektmerkmalen. Außerdem können mittels des Fähigkeitsmodells die Erfüllbarkeit von Anforderungen hinsichtlich der Fertigung eines neuen bzw. veränderten Produkts und von Anforderungen, die aus der Kombination von Fertigungsfähigkeiten resultieren, analysiert werden, ohne gravierende Änderungen der Anforderungsbeschreibungen oder des Analysevorgehens (siehe Fallstudie 1 und Fallstudie 3). Darüber hinaus besitzt das Fähigkeitsmodell gegenüber den diskutierten Ansätzen aus dem Stand der Forschung (siehe Unterkapitel 4.2), welche Fähigkeiten primär auf Basis von Prozessen und ihrer Merkmale beschreiben, noch weitere Vorteile hinsichtlich der Prüfung der Erfüllbarkeit und Änderungsbedarfsanalyse von Fertigungsanforderungen. Beispielsweise kann der Kommunikationsaufwand zwischen Produktentwickler und Hersteller reduziert werden, da das Fähigkeitsmodell bereits mögliche Ausgangs- und Eingangsprodukte des Fertigungssystems beschreibt. Hierdurch benötigt ein Produktenwickler hinsichtlich der Erfüllbarkeitsprüfung keine Informationen über Prozessmerkmale und kann weiter auf Produktebene arbeiten. Dies hat ebenfalls den Vorteil, dass vertrauliche Prozess- und Ressourceninformationen eines Herstellers gegenüber externen Produktentwicklern nicht zugänglich gemacht werden müssen, da die Abhängigkeitsinformationen zwischen Ressource, Prozess und Produktmerkmalen nicht kommuniziert

werden müssen. Des Weiteren bietet das Fähigkeitsmodell eine potentiell bessere Basis für eine effiziente Prüfung der Erfüllbarkeit von Fertigungsanforderungen, da die Anforderungsbeschreibung nicht in domänenspezifische Prozess- oder Ressourcenmerkmale überführt werden müssen, sondern z.B. direkt als Produktmerkmale beschrieben werden können. Eine effiziente Prüfung der Erfüllbarkeit ist wiederum wichtig für eine schnelle Rekonfiguration von Fertigungssystemen. Es ist hierbei wichtig anzumerken, dass in den Fallstudien zwar Sequenzen in Form von Prozessen in den Anforderungsbeschreibungen mit aufgeführten wurden, die Prozesse jedoch nur der Gruppierung der Fähigkeitsmodelle dienten und keinen konzeptionellen Einfluss auf die vorgestellte Methode haben. In der Methode selbst wurden ausschließlich die Merkmale der modellierten Eingangs- und Ausgangsobjekte für die Änderungsbedarfsermittlung analysiert und keine Prozessmerkmale betrachtet. Die Methode hätte ebenfalls mit Sequenzen in einer anderen Form, wie z.B. in einer Produktsequenz, dasselbe Ergebnis generiert.

Die Modellierungskomplexität des entwickelten Fähigkeitsmodellierungskonzepts ist zudem potentiell geringer als die Ansätze aus dem Stand der Forschung, da die Modellierung nicht auf der hohen Anzahl verschiedener Klassen und Unterklassen von Fertigungsprozessen basiert. Die Modellierungskomplexität des Fähigkeitsmodellierungskonzepts hängt jedoch stark von der Anzahl der Eingangs- und Ausgangsobjektmerkmale ab. Wenn dementsprechend Eingangs- und Ausgangsobjektmerkmale keine standardisierte Beschreibung besitzen, ist die Effizienz des Konzepts vermutlich begrenzt. Ohne standardisierte Merkmalbeschreibung besteht z.B. die Gefahr, dass Merkmale mehrfach durch Synonyme beschrieben werden, was den Abgleichprozess erschwert und dazu führt, dass die Merkmalanzahl unnötig steigt. Darüber hinaus kann die Identifizierung und Analyse von benötigten Abhängigkeiten zwischen den Objektmerkmalen ein hohes Maß an Fachwissen erfordern und zeitaufwendig sein. Ein weiterer kritischer Aspekt, der nicht in den Fallstudien untersucht wurde, ist der Lernaufwand für die Erstellung der Modelle. In den Fallstudien wurden die Informationen für die Modellierung sowie das Modellierungsergebnis zwar von den Ingenieuren bereitgestellt bzw. bewertet, jedoch wurden die Modelle nicht selbst von ihnen erstellt. Um die praktische Anwendbarkeit der Modellierung besser bewerten zu können, sollte dieser Aspekt in künftigen Studien berücksichtigt werden.

Ein weiterer Nachteil des erstellten Fähigkeitsmodellierungskonzepts besteht darin, dass die Fähigkeitsbeschreibungen möglicherweise aktualisiert werden müssen, wenn neue Eingangs- oder Ausgangsobjektmerkmale auftreten, die zum Modellierungszeitpunkt nicht bekannt waren. In diesem Fall müssen zusätzliche Analysen hinsichtlich der Merkmalabhängigkeiten durchgeführt werden. Das Fähigkeitsmodellierungskonzept ist zudem limitiert auf Merkmalbeschreibungen. Für die Prüfung der Erfüllbarkeit von zu fertigenden Produkten mit komplexen Geometrien ist das merkmalbasierte Konzept nicht gut geeignet, da die komplexen Geometrien zunächst auf Merkmale heruntergebrochen werden müssten, was sehr aufwändig wäre. In der dritten Fallstudie war zudem zu erkennen, dass für die Nutzung des Fähigkeitsmodellierungskonzepts eine semantisch eindeutige Beschreibung der Objekte und deren Merkmale notwendig ist, um korrekte Analyseergebnisse zu erhalten.

In den Fallstudien wurde ebenfalls aufgezeigt, dass das erstellte Abhängigkeitsmodell mit der dazu entwickelten Methode für die systematische Generierung von Änderungsmöglichkeiten auf Merkmalebene, unter Berücksichtigung der Änderungsauswirkungen auf das Fertigungssystem, geeignet ist. Dementsprechend erfüllt das Abhängigkeitsmodell die gestellte Anforderung 3. Das entwickelte Abhängigkeitsmodell basiert dabei auf dem Systemverständnis der *Formalisierten Prozessbeschreibung* und berücksichtigt daher ebenfalls die Abhängigkeiten zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen. In den Fallstudien wurde aufgezeigt, dass dadurch Änderungsauswirkungsanalysen und Änderungsmöglichkeiten erzeugt werden, die für Ingenieure gut nachvollziehbar sind. Aus diesem Grund

erfüllt das Abhängigkeitsmodell ebenfalls die gestellte Anforderung 4. Aufgrund dessen, dass die Abhängigkeitsmodelle im XML-Format abgelegt werden, liegen sie in einem maschinen-interpretierbaren Format vor, wodurch die gestellte Anforderung 5 erfüllt wird. Wie bereits oben beschrieben, werden das Abhängigkeitsmodell und das Fähigkeitsmodell mithilfe von *Interfaces* in AML systematisch und maschinen-interpretierbar verbunden, wodurch ein nahtloser Übergang zwischen der Änderungsbedarfsermittlung und der Generierung von Änderungsmöglichkeiten erreicht wird. Folglich erfüllt das Abhängigkeitsmodell ebenfalls die Anforderung 6 und erfüllt damit alle gestellten Anforderungen an ein Abhängigkeitsmodell in der vorliegenden Arbeit (siehe Unterkapitel 2.5).

Ein Vorteil des Abhängigkeitsmodells ist, dass die qualitative Modellierungsform einfach und zugänglich ist. Die Ingenieure in den Fallstudien konnten den Aufbau der Matrix schnell verstehen und die Inhalte korrekt auslesen. Ein weiterer Vorteil des Abhängigkeitsmodells ist, dass die Matrizen für weitere verschiedene Analysen genutzt werden können, um beispielsweise die Wandlungsfähigkeit eines Fertigungssystems zu untersuchen, wie in [FEL18%] gezeigt. Die Matrizen des Abhängigkeitsmodells in qualitativer Form sind zudem sehr einfach zu befüllen. In den Fallstudien konnte die gemeinsame Befüllung der Matrizen mithilfe der jeweiligen Ingenieure sehr schnell durchgeführt werden, nachdem die Abhängigkeiten ermittelt wurden. Hierbei ging jedoch deutlich aus den Fallstudien hervor, dass der Aufwand für die Erstellung der Abhängigkeitsmodelle von den Ingenieuren als sehr hoch wahrgenommen wurde. Dies lag einerseits an der Anzahl der zu beschreibenden Merkmale und anderseits vermutlich an dem Dokumentationsprozess selbst. Beispielsweise taten sich die Ingenieure teilweise schwer damit, die relevanten Merkmale eindeutig zu benennen. In den Fallstudien musste während der Erstellung der Matrizen mehrmals Merkmale umbenannt oder in mehrere Merkmale aufgeteilt werden. Im Vergleich zum sonstigen Vorgehen der Ingenieure, bei der die eindeutige Merkmalbenennung keine wesentliche Rolle einnimmt, wurde dieser Schritt deshalb wahrscheinlich als Mehraufwand betrachtet. Ein weiterer Schritt, der im Vergleich zum sonstigen Vorgehen der Ingenieure einen Mehraufwand darstellt, ist die Zerlegung und Umstrukturierung der mathematischen Formeln in die relevanten Ausdrücke für die Beschreibung der paarweisen Abhängigkeiten in den Matrizen. Dies benötigte insbesondere bei der quantitativen Abhängigkeitsmodellierung verhältnismäßig viel Zeit. Ein weiterer Nachteil des Abhängigkeitsmodells ist, dass die MDM überproportional wächst, wodurch die MDM für einen menschlichen Nutzer ab einer gewissen Größe unübersichtlich werden kann.

Aus den Fallstudien ging des Weiteren hervor, dass nach Einschätzung der Experten das Aufwand-Nutzen-Verhältnis vorteilhaft wäre, wenn die Modelle wiederverwendbar wären. Durch eine Wiederverwendung der Modelle könnte der Modellierungsaufwand bei nachfolgenden Änderungsprojekten reduziert werden. Dementsprechend würde sich das Aufwand-Nutzen-Verhältnis der vorgestellten Methoden in diesen Fällen vermutlich noch weiter verbessern. Um die Wiederverwendbarkeit des gesamten entwickelten Modellierungskonzepts zu bewerten, wurden die Anforderungen für ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept aus [SCH16] auf das einwickelte Modellierungskonzept angewandt. Das Ergebnis dieser Bewertung ist in Tabelle 10-1 dargestellt. Zum Vergleich wurde ebenfalls der Ansatz von Karl aus [KAR14] nach den Anforderungen bewertet, da der Ansatz für einen ähnlichen Untersuchungsbereich erstellt wurde. Das Bewertungsergebnis ist ebenfalls in Tabelle 10-1 aufgeführt. Die Erfüllungskriterien der Anforderungen können der Tabelle 10-2 und Tabelle 10-3 entnommen werden. Anhand der Tabelle 10-1 ist erkennbar, dass das entwickelte Modellierungskonzept lediglich sieben von 16 der Anforderungen aus [SCH16] vollständig oder teilweise erfüllt. Das Modellierungskonzept besitzt jedoch eine höhere Wiederverwendbarkeit als der Ansatz von Karl. Beispielsweise ist in der Tabelle zu erkennen, dass das entwickelte Modellierungskonzept die Anforderungen, dass wiederverwendbare Einheiten in Kombination mit den relevanten Funktionen und Parameterausprägungen

abgelegt werden müssen (M-6) und mit neu entwickelten Inhalten kombiniert werden können (M-7) vollständig erfüllt, wohingegen der Ansatz von Karl diese Anforderungen nur teilweise erfüllt. Ähnliches gilt für die Anforderung, dass eine gewerkeübergreifende Funktionsbeschreibung als Basis für alle Wiederverwendungstätigkeiten genutzt werden soll (M-9), die vom entwickelten Modellierungskonzept vollständig erfüllt wird und von Karls Ansatz nicht erfüllt wird.

Anforderung M-6 erfüllt das entwickelte Modellierungskonzept, da die Fähigkeiten anhand der Systemobjekte sowie deren Merkmale eindeutig bestimmt werden können. Beim Ansatz von Karl hingegen gibt es keine explizite Fähigkeitsbeschreibung. Die Fähigkeiten des Fertigungssystems könnten höchstens anhand der Produktmerkmale identifiziert werden, wobei es im Ansatz von Karl keine Unterscheidung zwischen Eingangs- und Ausgangsproduktmerkmalen gibt. Anforderung M-7 wird ebenfalls nur teilweise vom Ansatz von Karl erfüllt, da die Modelle in dem Ansatz nur schwer mit neu entwickelten Artefakten kombinierbar sind. Grund hierfür ist, dass keine Dekomposition der Modelle vorgesehen ist. Dies führt dazu, dass beispielsweise die Abhängigkeitsmatrizen im Ansatz von Karl bei jeder Kombination einzeln erweitert werden müssen. Im neuen Modellierungskonzept können die bereits erstellten Modelle bei einer Kombination mit einem neuen Artefakt wiederverwendet werden, da hierbei nur eine neue komponierte Fähigkeitsbeschreibung und eine MDM für die komponierte Fähigkeit erstellt werden müssen. Die bereits erstellten Modelle werden dabei integriert. Die Anforderung M-9 wird nicht vom Ansatz von Karl erfüllt, da keine Fähigkeitsorientierung vorliegt. Im entwickelten Modellierungsansatz hingegen, ist das Fähigkeitsmodell gewerkeübergreifend, besitzt eine zentrale Rolle und ist dem Abhängigkeitsmodell vorgelagert.

Des Weiteren ist der Tabelle 10-1 zu entnehmen, dass das entwickelte Modellierungskonzept die Anforderung E-1 teilweise erfüllt, wohingegen der Ansatz von Karl diese Anforderung nicht erfüllt. Grund hierfür ist, dass das entwickelte Modellierungskonzept eine Dekomposition der Fähigkeiten nach [VDI/VDE 3682] vorsieht. Im Ansatz von Karl wird die Dekomposition in keiner Form betrachtet.

Auf Basis der vorherigen Ausführungen kann zusammengefasst werden, dass die erstellten Modelle alle gestellten Anforderungen erfüllen und im Zusammenspiel mit den entwickelten Methoden dafür genutzt werden können, um automatisiert den Änderungsbedarf sowie dazugehörige Änderungsmöglichkeiten auf Merkmalebene an automatisierten Fertigungsmaschinen, die sich bereits in der Betriebsphase befinden, zu ermitteln. Dementsprechend wurden die beiden deklarierten Teilziele der vorliegenden Arbeit (siehe Unterkapitel 2.4) erreicht. Anhand der durchgeführten Fallstudien konnte zudem gezeigt werden, dass die entwickelten Modellierungskonzepte und Methoden nutzenstiftend für die Arbeit von Ingenieuren eingesetzt werden können. Dieser Nutzen kann jedoch noch erhöht werden, indem die Wiederverwendbarkeit der Modelle gesteigert wird. Infolgedessen können die beiden gestellten Teilforschungsfragen aus Unterkapitel 2.4 positiv beantwortet werden.

Tabelle 10-1 Bewertung des entwickelten Modellierungskonzepts und des Ansatzes von Karl nach den Anforderungen an ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept aus [SCH16]

Anforderung	Ansatz von Karl	Entwickeltes Konzept
M-1: Wiederverwendung im Engineering muss systematisch erfolgen	○	○
M-2: Ein Wiederverwendungskonzept soll mehrere am Engineering beteiligte Gewerke integrieren	◑	◑
M-3: Wiederverwendbare Einheiten müssen hinsichtlich deren Eignung zur Wiederverwendung analysiert werden können	○	○
M-4: Wiederverwendbare Einheiten müssen aus bestehenden Lösungen extrahiert werden können	○	○
M-5: Wiederverwendbare Einheiten müssen einen Freigabeprozess durchlaufen	○	○
M-6: Wiederverwendbare Einheiten müssen anhand deren Funktionen und Parameter identifizierbar sein	◑	●
M-7: Wiederverwendbare Einheiten müssen mit neu entwickelten Artefakten kombiniert werden können	◑	●
M-8: Erkenntnisse aus Service und Instandhaltung müssen in die Entwicklung und Aktualisierung wiederverwendbarer Einheiten einfließen	○	○
M-9: Die Funktionsorientierung dominiert alle Tätigkeiten für oder mit Wiederverwendung	○	●
E-1: Die Dekomposition muss sich an den domänen-spezifischen Normen orientieren	○	◑
E-2: Gewerkeübergreifende Relationen müssen berücksichtigt werden	●	●
E-3: Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten muss explizit modelliert werden	○	○
E-4: Wiederverwendbare Einheiten müssen Dokumentation enthalten	○	○
O-1: Die Integration der Wiederverwendung in die Prozesse der Engineering-Organisation muss ermöglicht werden	○	○
W-1: Das Wiederverwendungskonzept muss sich in bestehende Werkzeuge der Engineering-Organisation integrieren lassen	◑	◑
W-2: Wiederverwendung muss dokumentiert werden und bidirektional nachvollziehbar sein	○	○

○ Nicht erfüllt ◑ Teilweise erfüllt ● Vollständig erfüllt

Tabelle 10-2 Anforderungen an ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept: Teil 1

Anforderung	Erfüllungskritierum
M-1: Wiederverwendung im Engineering muss systematisch erfolgen	Das Konzept definiert ein systematisches Vorgehen für die Entwicklung, die Pflege sowie die Anwendung der wiederverwendbaren Einheiten.
M-2: Ein Wiederverwendungskonzept soll mehrere am Engineering beteiligte Gewerke integrieren	Es wird das führende Gewerk sowie mindestens eines der nachfolgenden Gewerke in die Einführung sowie die Umsetzung des Wiederverwendungskonzepts involviert. Die Anforderung wird als bedingt erfüllt angesehen, wenn zumindest verschiedenartige Artefakte mehrerer Gewerke berücksichtigt und kombiniert werden.
M-3: Wiederverwendbare Einheiten müssen hinsichtlich deren Eignung zur Wiederverwendung analysiert werden können	Das Konzept sieht Techniken vor, um Funktionen hinsichtlich deren Eignung zur Wiederverwendung zu bewerten. Diese Bewertung muss Faktoren, wie die Charakteristika der Funktion und deren Umsetzung, die Fähigkeiten und Kenntnisse der Engineering-Organisation sowie die Entwicklung der potentiellen Märkte umfassen.
M-4: Wiederverwendbare Einheiten müssen aus bestehenden Lösungen extrahiert werden können	Das Konzept sieht die systematische Extraktion wiederverwendbarer Einheiten aus bestehenden Lösungen vor.
M-5: Wiederverwendbare Einheiten müssen einen Freigabeprozess durchlaufen	Das Konzept sieht einen systematischen Freigabeprozess der wiederverwendbaren Einheiten vor, der anhand transparenter Kriterien und Techniken zu erfolgen hat und interdisziplinäre Aspekte in Betracht zieht.
M-6: Wiederverwendbare Einheiten müssen anhand deren Funktionen und Parameter identifizierbar sein	Wiederverwendbare Einheiten werden in Kombination mit den relevanten Funktionen und Parameterausprägungen unter Berücksichtigung der Variabilität abgelegt. Die Anforderung wird als bedingt erfüllt angesehen, wenn dies zwar konzeptionell möglich, nicht jedoch explizit beschrieben ist. Die Erfüllung dieser Anforderung korreliert jedoch stark mit den möglichen Umsetzungen in Engineering-Werkzeugen.
M-7: Wiederverwendbare Einheiten müssen mit neu entwickelten Artefakten kombiniert werden können	Das Konzept sieht im Bereich der projektabhängigen Tätigkeiten die Kombination von wiederverwendeten und neu entwickelten Inhalten vor, sodass sich eine kombinierte Lösung erarbeiten lässt.

Tabelle 10-3 Anforderungen an ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept: Teil 2

Anforderung	Erfüllungskritierum
M-8: Erkenntnisse aus Service und Instandhaltung müssen in die Entwicklung und Aktualisierung wiederverwendbarer Einheiten einfließen	Das Konzept sieht eine systematische Berücksichtigung von Erkenntnissen aus Service und Instandhaltung in der Entwicklung und der Aktualisierung der wiederverwendbaren Einheiten vor.
M-9: Die Funktionsorientierung dominiert alle Tätigkeiten für oder mit Wiederverwendung	Es existiert eine Technik, um eine gewerkeübergreifende Definition wiederverwendbarer Inhalte anhand von Funktionen vorzunehmen. Allerdings muss diese Definition nicht zwingend auf allen Granularitätsebenen zwischen den beteiligten Gewerken deckungsgleich sein. Es muss jedoch möglich sein diese ggf. abweichenden Definitionen zueinander in Relation zu setzen.
E-1: Die Dekomposition muss sich an den domänen-spezifischen Normen orientieren.	Die Dekomposition der Anlage wird gewerkeübergreifend abgestimmt und anhand einschlägiger Normen strukturiert.
E-2: Gewerkeübergreifende Relationen müssen berücksichtigt werden	Es werden neben den gewerkspezifischen auch gewerkeübergreifende Relationen modelliert bzw. dokumentiert und berücksichtigt.
E-3: Variabilität in wiederverwendbaren Einheiten muss explizit modelliert werden	Die Einheiten erlauben die explizite Modellierung von Variabilität. Hierbei ist nicht von Bedeutung welcher Ansatz zur Variabilitätsmodellierung angewendet wird. Die Anforderung wird als bedingt erfüllt angesehen, wenn zumindest verschiedene Varianten wiederverwendbarer Artefakte vorgehalten werden.
E-4: Wiederverwendbare Einheiten müssen Dokumentation enthalten	Die wiederverwendbaren Einheiten enthalten Dokumentation, die benötigt wird, um die wiederverwendbare Einheit anzuwenden, wie auch mögliche Anteile einer zukünftigen Anlagendokumentation, welche die Teile betrifft, die durch die wiederverwendbare Einheit realisiert werden, in adäquater Form.
O-1: Die Integration der Wiederverwendung in die Prozesse der Engineering-Organisation muss ermöglicht werden	Das Konzept kann an bestehende Prozesse angepasst und systematisch eingeführt werden. Wird die Prozessintegration nicht explizit beschrieben, aber in einem Fallbeispiel schlüssig nachgewiesen, so wird diese Anforderung als bedingt erfüllt angesehen.
W-1: Das Wiederverwendungs-konzept muss sich in bestehende Werkzeuge der Engineering-Organisation integrieren lassen	Das Konzept kann in verschiedenen Engineering-Werkzeugen umgesetzt werden.
W-2: Wiederverwendung muss dokumentiert werden und bidirektional nachvollziehbar sein	Das Konzept sieht die Dokumentation sowie die Nachvollziehbarkeit der Beziehungen zwischen wiederverwendbaren Einheiten und deren Verwendung vor.

11 Zusammenfassung und Ausblick

11.1 Zusammenfassung

Aufgrund eines stetig zunehmenden dynamischen Umfelds stehen Produktionssysteme vor der Herausforderung sich rasch wechselnden Anforderungen anzupassen. Verschiedene Trends wie beispielsweise die stärkere Individualisierung von Produkten, der verkürzte Produktlebenszyklus sowie die immer schnellere Entwicklung von neuen Technologien gehören zu wesentlichen Ursachen des zunehmenden dynamischen Produktionsumfelds. Aufgrund der ständig wechselnden Anforderungen benötigen Produktionssysteme im Laufe ihrer teils jahrzehntelangen Betriebsphase technische Änderungen am physischen System sowie an der Systemsteuerungssoftware, um neuaufkommenden Anforderungen gerecht zu werden. Die meisten Produktionssysteme sind hierbei hoch komplex, weshalb die Durchführung der technischen Änderung ein schwieriges und zeitintensives Unterfangen ist. Dabei kommt erschwerend hinzu, dass die technischen Änderungen in der Praxis fast ohne jegliche methodische Unterstützung sowie unter hohem Zeitdruck durchgeführt werden müssen, wodurch die Änderungsresultate häufig fehlerbehaftet sind und stark vom individuellen Wissen der Ingenieure abhängen. Aufgrund dieses Missstandes war das Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung geeigneter Modelle und Methoden für eine automatisierte Analyse von Produktionssystemen hinsichtlich technischer Änderungen. Angesichts der Weitläufigkeit der Problematik wurde der Untersuchungsgegenstand der Arbeit auf automatisierte Fertigungsmaschinen und deren Baugruppen beschränkt, die sich bereits in ihrer Betriebsphase befanden. Darüber hinaus fokussierte sich die Arbeit auf die Änderungsbedarfsermittlung und die Generierung der dazugehörigen Änderungsmöglichkeiten auf Merkmalebene.

Eine Analyse der Fachliteratur ergab, dass diverse Ansätze bestehen, die sich entweder auf die Änderungsbedarfsermittlung oder auf die Änderungsmöglichkeitsgenerierung fokussiert haben. Die meisten Ansätze wurden jedoch meist für einen Untersuchungsbereich, der nicht mit dem Untersuchungsbereich der vorliegenden Arbeit übereinstimmt, entwickelt. Aufgrund dessen erfüllten diese bestehenden Ansätze nicht die (an die zu erarbeitende Lösung) gestellten Anforderungen der vorliegenden Arbeit. Das primäre Defizit dieser Ansätze besteht in der fehlenden Verknüpfung des Änderungsbedarfs mit der Generierung von Änderungsmöglichkeiten, da lediglich ein Teilproblem betrachtet wird. Von den analysierten Ansätzen aus der Fachliteratur betrachte nur ein Ansatz beide Teilprobleme gemeinsam. Allerdings wurde in der Analyse deutlich, dass dieser Ansatz die gestellte Anforderung bezüglich der systematischen Verknüpfung des Änderungsbedarfs mit der Änderungsmöglichkeitsgenerierung ebenfalls nicht erfüllt. Auf Basis dieser Analyse wurde ein Handlungsbedarf bezüglich der eingegrenzten Problematik abgeleitet. Der Handlungsbedarf bestand darin, dass Modelle und Methoden für die Änderungsbedarfsermittlung und für die Generierung von Änderungsmöglichkeiten benötigt werden, die systematisch miteinander verbunden und aufeinander abgestimmt sind, um den Grundstein für einen effizienten und durchgängigen technischen Änderungsprozess zu legen.

Um den identifizierten Handlungsbedarf zu decken und zur Erreichung der deklarierten Zielsetzung beizutragen, wurde in der vorliegenden Arbeit ein Fähigkeitsmodell und ein Abhängigkeitsmodell basierend auf dem Systemverständnis der *Formalisierten Prozessbeschreibung* erstellt. Beide Modelle wurden zudem mithilfe der *Automation Markup Language* maschinenlesbar und systematisch miteinander verknüpft. Hierdurch konnten die entwickelten Methoden für die Änderungsbedarfsermittlung und Generierung von Änderungsmöglichkeiten automatisiert und durchgängig miteinander verbunden

werden. Zusätzlich zu den entwickelten Modellen benötigte die Methode für die Änderungsbedarfsermittlung eine Anforderungsbeschreibung in Form einer Merkmalliste. Diese Anforderungsbeschreibung konnte dabei entweder ein zu fertigendes Produkt oder eine zu kombinierende Fähigkeit, die beispielsweise aufgrund einer Rekonfiguration auftritt, darstellen. Der ermittelte Änderungsbedarf fungierte als Input für die Methode der Generierung von Änderungsmöglichkeiten, die mittels des Abhängigkeitsmodells Änderungsmöglichkeiten automatisiert generiert und diese als Baumgraphen darstellt.

Der entwickelte Ansatz wurde anhand von drei Fallstudien validiert. In den Fallstudien wurde der Ansatz jeweils an einer industriellen Fertigungsmaschine angewandt. Hierfür wurde eine prototypische Softwareapplikation in der Programmiersprache *Java* erstellt, die die Analysen automatisiert durchführte. Die generierten Resultate wurden von Experten in den jeweiligen Fallstudien begutachtet. Der Großteil der Resultate wurde dabei für korrekt befunden. Die fehlerhaften Resultate konnten hierbei auf eine nicht eindeutige semantische Beschreibung der Objektmerkmale zurückgeführt werden. Im Rahmen der Fallstudien wurden ebenfalls unstrukturierte Interviews mit den Experten geführt, um eine Einschätzung bezüglich der Nützlichkeit des entwickelten Ansatzes in der Praxis zu erhalten. Die Einschätzungen diesbezüglich waren positiv, und es konnte ein grundsätzlicher Nutzen ausgemacht werden. Zusätzlich wurden weitere Impulse von den Experten bezüglich möglicher Erweiterungen des Ansatzes gegeben. Aus den Interviews ging ebenfalls hervor, dass das Aufwand-Nutzen-Verhältnis des Ansatzes als kritisch eingestuft wird, wenn die benötigten Modelle nicht wiederverwendet werden können. Abschließend wurde der entwickelte Ansatz anhand der gestellten Anforderungen sowie der erzielten Erkenntnisse aus den Fallstudien kritisch beurteilt. Hierbei wurde festgestellt, dass der entwickelte Ansatz alle gestellten Anforderungen erfüllen konnte und dass die Zielsetzung der Arbeit erreicht wurde. Zusätzlich wurde aufgrund der Anmerkung aus den Fallstudien eine Wiederverwendbarkeitsbewertung des erstellten Ansatzes durchgeführt. Die Wiederverwendbarkeitsbewertung ergab dabei, dass der entwickelte Ansatz hinsichtlich der Wiederverwendbarkeit noch ausbaufähig ist, jedoch im Vergleich zu einem Ansatz, der eine ähnliche Problematik untersuchte, höher war.

11.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit präsentiert einen Ansatz für die automatisierte Ermittlung von technischen Änderungsbedarfen und der Generierung dazugehöriger Änderungsmöglichkeiten auf Merkmalebene für automatisierte Fertigungsmaschinen und deren Baugruppen. Hinsichtlich der Herausforderungen, die technischen Änderungen an Produktionssystemen für die Praxis darstellen, trägt der entwickelte Ansatz lediglich zu der Lösung eines kleinen Teilproblems bei. Dementsprechend besteht noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Thematik der vorliegenden Arbeit. Im Folgenden wird der Forschungsbedarf unterteilt in die beiden Kategorien *Optimierung des entwickelten Ansatzes* und *Erweiterung des Anwendungsbereichs des entwickelten Ansatzes*.

Optimierung des entwickelten Ansatzes

Ein wichtiger Forschungsbedarf hinsichtlich der Optimierung des entwickelten Ansatzes ist die eindeutige semantische Beschreibung der Produktionssystemobjekte und ihrer Merkmale. Aus den Fallstudien ging hervor, dass dies eine wichtige Basis für den automatisierten Ansatz ist, da ohne eine gemeinsame semantische Grundlage es weiterhin menschlichen Handelns bedarf, um die Analyseergebnisse zu korrigieren. Um eine solche Grundlage herzustellen, könnten Merkmalstandards wie der eCl@ss-Standard und die Norm [DIN EN ISO 8000] herangezogen werden.

Ein weiterer wichtiger Forschungsbedarf, der ebenfalls aus den durchgeführten Fallstudien hervorging, ist die (teil-)automatische Generierung der Modelle aus vorhandenen Engineering-Artefakten. Die (teil-)automatisierte Modellgenerierung würde dabei die praktische Anwendbarkeit und den resultierenden Nutzen des entwickelten Ansatzes signifikant steigern, da der Modellerstellungsaufwand in den Fallstudien einer der Hauptkritikpunkte des entwickelten Ansatzes darstellte. In der Fachliteratur wurde in verschiedenen Ansätzen gezeigt, dass dies bereits für bestimmte Typen von Engineering-Artefakten möglich ist, wie beispielsweise in [ARR17] und in [TFD18]. In diesem Zusammenhang wäre es ebenfalls sinnvoll, die Verknüpfung der entwickelten Modelle mit weiteren Daten und Informationen zu untersuchen, um den Nutzen der Modelle nochmals zu erweitern. In diesem Zusammenhang kann ebenfalls untersucht werden inwiefern der Modellierungsaufwand durch ein geeignetes Assistenzsystem, wie beispielsweise in [MaWe19] vorgestellt, reduziert werden kann. Außerdem könnte in zukünftigen Forschungsarbeiten untersucht werden, ob der entwickelte Ansatz effizient mit Ansätzen kombiniert werden kann, die zur Identifikation von wiederverwendbaren Fertigungsmodulen genutzt werden, wie in [KKJ+13] und [WKF14] präsentiert, um eine höhere Wiederverwendbarkeit der Modelle zu erhalten, wodurch sich das Nutzen-Aufwand-Verhältnis verbessert.

Ein interessanter Forschungsaspekt wäre außerdem die Optimierung und Erweiterung der Methode für die Änderungsbedarfsermittlung hinsichtlich der automatischen Ermittlung von möglichen Fähigkeitskombinationen. Hierbei könnte untersucht werden, ob anhand der Anforderungsbeschreibungen und den Fähigkeitsmodellen ebenfalls eine Änderungsbedarfsanalyse ohne Angabe einer Fähigkeitssequenz durchgeführt werden kann. Um dies zu erreichen, müsste anhand der Eingangs- und Ausgangsobjektbeschreibungen der Fähigkeitsmodelle iterativ eine Kombination ermittelt werden, die aus miteinander kompatiblen Fähigkeiten besteht und die Merkmale der Anforderungsbeschreibung enthält. Ein solches Vorgehen hätte des Weiteren den Vorteil, dass Fähigkeitskombinationen ermittelt werden würden, die vorher vom Anwender nicht in Betracht gezogen wurden.

Hinsichtlich der Änderungsbedarfsermittlung ist zudem ein weiterer Forschungsbedarf die Ermittlung von Änderungsbedarfen, die aus strukturellen oder verhaltenstechnischen Aspekten resultieren. Solche Änderungsbedarfe können beispielsweise bei der Kombination der physischen und softwaretechnischen Bestandteile des Fertigungssystems auftreten. In der vorgestellten Form des entwickelten Ansatzes können ausschließlich Änderungsbedarfe ermittelt werden, die aufgrund von Limitationen der Fertigungsfähigkeiten entstehen.

Erweiterung des Anwendungsbereichs des entwickelten Ansatzes

Hinsichtlich der Erweiterung des Anwendungsbereichs ist ein Forschungsbedarf die Entwicklung einer automatisierten sowie systematischen Bewertung und Auswahl der generierten Änderungsmöglichkeiten. Dies würde eine methodische Unterstützung der dritten Phase des Änderungsprozesses ermöglichen und den Anwendungsbereich des Ansatzes damit auf die Entscheidungsphase erweitern, welche direkt an die bislang betrachtete Bedarfsermittlungs- und Lösungsfindungsphase anschließt. Darüber hinaus wurde der aktuelle Ansatz nur auf Fertigungssysteme angewandt, die sich bereits in der Betriebsphase befinden. Dementsprechend wäre eine Untersuchung hinsichtlich der Anwendbarkeit des entwickelten Ansatzes auf Fertigungsmaschinen in einer früheren Lebensphase ebenfalls interessant, da wie in Kapitel 2 beschrieben, Fertigungsmaschinen bereits in der Entwurfsphase technischen Änderungen unterliegen können. Hierdurch könnten außerdem Synergieeffekte für die Erstellung der benötigten Modelle entstehen, da die erstellten Modelle ebenfalls in der Betriebsphase wiederverwen-

det werden könnten. Zudem könnte eine Erstellung der benötigten Modelle in einer frühen Lebenszyklusphase den Vorteil besitzen, dass die Komplexität der Modelle zunächst geringer ist und sukzessive mit den Lebenszyklusphasen wächst.

Des Weiteren betrachtete der entwickelte Ansatz ausschließlich Fertigungsmaschinen und deren Baugruppen. Dementsprechend wäre eine noch offene Forschungsfrage in diesem Zusammenhang, inwiefern der Ansatz ebenfalls für Fertigungssysteme auf Produktionsbereichs- oder Fabrikebene anwendbar ist. Darüber hinaus wäre es ebenfalls interessant zu erforschen, bis zu welchem Grad der erstellte Ansatz für verfahrenstechnische Produktionssysteme geeignet ist.

Hinsichtlich der Änderungsart fokussierte sich der entwickelte Ansatz auf die Anpassung von Merkmalausprägungen, da diese Änderungen potentiell ein gutes Aufwand-Nutzen-Verhältnis aufweisen. Änderungen hinsichtlich der Integration von neuen Fertigungsfähigkeiten und Materialflussverbindungen werden vom Ansatz nicht berücksichtigt. Dementsprechend besteht ein weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Integration der beiden nicht betrachteten Änderungsarten in dem Ansatz. Hierdurch könnte der Ansatz eine umfassendere Unterstützung bezüglich der verschiedenen Arten von technischen Änderungen bereitstellen.

Literaturverzeichnis

Referenzierte Literatur

[ABD+18] T. Apprich, J. Brenner, M. Dambacher, F. Dreher, G. Fischer, G. Greiner, B. Heine, A. Hochstatter, S. Holzberger, F. Holzwarth, H. Kaiser, T. Liesch, A. Pflug, D. Schmid, T. Tawakoli, R. Vogel: Tabellenbuch Zerspantechnik. 3. Auflage. Haan: Europa-Lehrmittel, 2018.

[AbRe11] E. Abele, G. Reinhart: *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen.* München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2011.

[Ant12] G. Antoniou: *A Semantic Web primer.* Cambridge, MA: The MIT Press, 2012.

[Arr17] E. Arroyo Esquivel: *Capturing and Exploiting Plant Topology and Process Information as a Basis to Support Engineering and Operational Activities in Process Plants.* Hamburg, Universitätsbibliothek der Helmut-Schmidt-Universität, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, 2017.

[AtSu12] Ateekh-Ur-Rehman, A. Subash Babu: *Reconfigurations of manufacturing systems—an empirical study on concepts, research, and applications.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 66 (1), 2012, S. 107–124.

[AWC13] N. Ahmad, D.C. Wynn, P.J. Clarkson: *Change impact on a product and its redesign process: A tool for knowledge capture and reuse.* Research in Engineering Design, Vol. 24 (3), 2013, S. 219–244.

[BaRe15] J. Backhaus, G. Reinhart: *Digital description of products, processes and resources for task-oriented programming of assembly systems.* Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 28 (8), 2015, S. 1787–1800.

[BBL+16] L. Berardinelli, S. Biffl, A. Lüder, E. Mätzler, T. Mayerhofer, M. Wimmer, S. Wolny: *Cross-disciplinary engineering with AutomationML and SysML.* at - Automatisierungstechnik, Vol. 64 (4), 2016, S. 253 - 269.

[BBM+15] L. Berardinelli, S. Biffl, E. Maetzler, T. Mayerhofer, M. Wimmer: *Model-based co-evolution of production systems and their libraries with AutomationML.* In: *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA): 8 - 11 Sept. 2015, City of Luxembourg, Luxembourg.* Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–8, 2015.

[BBR18] H. Bauer, F. Brandl, G. Reinhart: *Manufacturing Change Impact Analysis: Approach for an Individual Design.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 113 (12), 2018, S. 819–823.

[Bel08] P.M. Belener: *Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse.* Aachen: Shaker Verlag, 2008.

[Ber06] M. Bergholz: *Objektorientierte Fabrikplanung.* Aachen: Shaker, 2006 (Berichte aus der Produktionstechnik, 2006,31).

[BeSä10] M. Bellgran, K. Säfsten: *Production Development: Design and Operation of Production Systems.* London: Springer-Verlag London, 2010.

[BMQ+10] D. Behnen, H. Mersch, C. Quix, D. Schmilz, M. Zhang, K. Fayzullin, C. Brecher, U. Epple, M. Jarke: Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Modellierung von prozesstechnischen und diskreten Produktionssystemen. In: Fachtagung Entwurf Komplexer Automatisierungssysteme (EKA), Vol. 11, S. 1–10, 2010.

[BRWY18] A. Brahma, D.C. Wynn: *A new model for capturing design information with an aim to aid change propagation assessment and subsequent redesign.* In: *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference,* S. 1499–1510, 2018.

[CCW17] E.F. Colombo, G. Cascini, O.L. de Weck: Classification of Change-Related Ilities Based on a Literature Review of Engineering Changes. Journal of Integrated Design and Process Science, Vol. 20 (4), 2017, S. 3–23.

[CHR06] G. Chryssolouris: *Manufacturing Systems: Theory and Practice.* New York: Springer-Verlag, 2006.

[CON97] J.-I. Conrat Niemerg: *Änderungskosten in der Produktentwicklung.* München: Technische Universität München, 1997.

[CSE04] P.J. Clarkson, C. Simons, C. Eckert: *Predicting Change Propagation in Complex Design.* Journal of Mechanical Design, Vol. 126 (5), 2004, S. 788–797.

[CYM+07] A.F. Cutting-Decelle, R.I.M. Young, J.J. Michel, R. Grangel, J. Le Cardinal, J.P. Bourey: *ISO 15531 MANDATE: A Product-process-resource based Approach for Managing Modularity in Production Management.* Concurrent Engineering, Vol. 15 (2), 2007, S. 217–235.

[DEL14] L. Delligatti: *SysML distilled: A brief guide to the systems modeling language.* Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2014.

[DEN12] A. Dengel: *Semantische Technologien.* Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2012.

[DFL+17] P. Danny, P. Ferreira, N. Lohse, M. Guedes: *An AutomationML model for plug-and-produce assembly systems.* In: *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN): University of Applied Science Emden/Leer, Emden, Germany, 24-26 July 2017: proceedings.* Piscataway, NJ: IEEE, S. 849–854, 2017.

[DOLA09] K. Doppler, C. Lauterburg: *Change-Management: den Unternehmenswandel gestalten.* Frankfurt/Main: Campus Verlag, 2009.

[DRA10] R. Drath (Hrsg.): *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML: Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch), 2010.

[ECK15] K. Eckert: Funktionaler Anwendungsentwurf verteilter Automatisierungssysteme: Anwendung von Entwurfsmustern in der Automatisierungstechnik. Hamburg, Deutschland, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, 2015.

[ECW+09] C. Eckert, J. Clarkson, O. de Weck, R. Keller: *Engineering change: drivers, sources, and approaches in industry.* In: *DS 58-4: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 4, Product and Systems Design, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08. 2009,* 2009.

[ECZ04] C. Eckert, P.J. Clarkson, W. Zanker: *Change and customisation in complex engineering domains.* Research in Engineering Design, Vol. 15 (1), 2004, S. 1–21.

[EGB+14] B. Eisenbart, K. Gericke, L. Blessing, others: *Application of the IFM framework for modelling and analysing system functionality.* In: *DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference,* S. 153–162, 2014.

[ELM06] H.A. Elmaraghy: *Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms.* International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 17 (4), 2006, S. 261–276.

[EME+17] H. ElMaraghy, M. Moussa, W. ElMaraghy, M. Abbas: *Integrated Product / System Design and Planning for New Product Family in a Changeable Learning Factory.* Procedia Manufacturing, Vol. 9, 2017, S. 65–72.

[ERA+06] R. Enparantza, O. Revilla, A. Azkarate, J. Zendoia: *A life cycle cost calculation and management system for machine tools.* Proceedings of LCE2006, 2006, S. 717–722.

[EWS97] W. Eversheim, L. Warnke, T. Schröder: *Änderungsmanagement in Entwicklungskooperationen.* VDI-Z, Vol. 139 (3), 1997, S. 60–63.

[FBO07] R. Frei, J. Barata, M. Onori: *Evolvable Production Systems Context and Implications.* In: *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics,* S. 3233–3238, 2007.

[FEL98] H. Felix: *Unternehmens- und Fabrikplanung: Planungsprozesse, Leistungen und Beziehungen*. 1. Aufl. München: Hanser, 1998 (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation).

[FELO12] P. Ferreira, N. Lohse: *Configuration model for evolvable assembly systems.* In: *4th CIRP Conference on Assembly Technology and Systems.* Ann Arbor, USA, S. 75–80, 2012.

[FMS15] S. Friedenthal, A. Moore, R. Steiner: *A practical guide to SysML: The systems modeling language*. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2015 (The MK / OMG Press)

[GIL13] C. Gille: *Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte: Kostenanalyse am Beispiel der Groß- und Kleinserienfertigung im Maschinenbau*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.

[GRA13A] M. Grande (Hrsg.): *100 Minuten für Konfigurationsmanagement: Kompaktes Wissen nicht nur für Projektleiter und Entwickler*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2013.

[GRA13B] M. Grande: Änderungsmanagement. In: Grande (Hrsg.): *100 Minuten für Konfigurationsmanagement: Kompaktes Wissen nicht nur für Projektleiter und Entwickler*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, S. 79–88, 2013.

[GSG+09] J. Gausemeier, W. Schäfer, J. Greenyer, S. Kahl, S. Pook, J. Rieke: *Management of Cross-Domain Model Consistency During the Development of Advanced Mechatronic Systems.* In: *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09).* University of Stanford, CA, USA: Design Society, Vol. 6, S. 1–12, 2009.

[HAD15] T. Hadlich: *Verwendung von Merkmalen im Engineering von Systemen.* Magdeburg, Universität Magdeburg, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Dissertation, 2015.

[HADI14] T. Hadlich, C. Diedrich: *Verwendung von Merkmalen für die funktionale Modellierung.* In: *Automation Congress,* 2014.

[HAM13] B. Hamraz: *Engineering change modelling using a function-behaviour-structure scheme.* Cambridge, University of Cambridge, Department of Engineering,. Dissertation, 2013.

[HRW10] T. Heinen, C. Rimpau, A. Wörn: *Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung.* In: Nyhuis (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme.* Berlin: GITO-Verl. (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB)), S. 19–32, 2010.

[HSF+13] T. Holm, S. Schröck, Fay, Alexander, Jäger, Tobias, Löwen Ulrich: *Engineering von „Mechatronik und Software“ in automatisierten Anlagen: Anforderungen und Stand der Technik.* In: Wagner (Hrsg.): *Software Engineering 2013 - Workshopband.* Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V, S. 261–272, 2013.

[HUMA99] G.Q. Huang, K.L. Mak: *Current practices of engineering change management in UK manufacturing industries.* International Journal of Operations & Production Management, Vol. 19 (1), 1999, S. 21–37.

[HYM03] G.Q. Huang, W.Y. Yee, K.L. Mak: *Current practice of engineering change management in Hong Kong manufacturing industries.* Journal of Materials Processing Technology, Vol. 139 (1), 2003, S. 481–487.

[JEC+11] T.A.W. Jarratt, C.M. Eckert, N.H.M. Caldwell, P.J. Clarkson: *Engineering change: An overview and perspective on the literature.* Research in Engineering Design, Vol. 22 (2), 2011, S. 103–124.

[JFW+11] T. Jäger, A. Fay, T. Wagner, U. Lowen: *Mining technical dependencies throughout engineering process knowledge.* In: Mammeri (Hrsg.): *IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2011: Toulouse, France, 5 - 9 Sept. 2011.* Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–7, 2011.

[JHS+18] E. Järvenpää, O. Hylli, N. Siltala, M. Lanz: *Utilizing SPIN Rules to Infer the Parameters for Combined Capabilities of Aggregated Manufacturing Resources.* IFAC-PapersOnLine, Vol. 51 (11), 2018, S. 84–89.

[JLL+11] E. Järvenpää, P. Luostarinen, M. Lanz, R. Tuokko: *Presenting capabilities of resources and resource combinations to support production system adaptation.* In: *2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM),* S. 1–6, 2011.

[JLL+12] E. Järvenpää, M. Lanz, P. Luostarinen, R. Tuokko: *Adaptation of Manufacturing Systems in Dynamic Environment Based on Capability Description Method: INTECH Open Access Publisher,* 2012.

[JLT16] E. Järvenpää, M. Lanz, R. Tuokko: *Application of a capability-based adaptation methodology to a small-size production system.* International Journal of Manufacturing Technology and Management, Vol. 30 (1-2), 2016, S. 67–86.

[JSH+18A] E. Järvenpää, N. Siltala, O. Hylli, M. Lanz: *Product Model ontology and its use in capability-based matchmaking,* 2018, S. 1–6.

[JSH+18B] E. Järvenpää, N. Siltala, O. Hylli, M. Lanz: *The development of an ontology for describing the capabilities of manufacturing resources.* Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 23 (5), 2018, S. 1817.

[JSL16] E. Järvenpää, N. Siltala, M. Lanz: *Formal resource and capability descriptions supporting rapid reconfiguration of assembly systems.* In: *2016 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM): Fort Worth, TX, USA, August 21-24, 2016.* Piscataway, NJ: IEEE, S. 120–125, 2016.

[JÄTO13] E. Järvenpää, S. Torvinen: *Capability-Based Approach for Evaluating the Impact of Product Requirement Changes on the Production System.* In: Azevedo (Hrsg.): *Advances in sustainable and competitive manufacturing systems: 23rd International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing ; [FAIM 2013 ; Porto, Portugal ; proceedings].* Cham: Springer (Lecture Notes in Mechanical Engineering), S. 173–185, 2013.

[KAR14] [KAR14] F. Karl: *Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln.* München, Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb). Dissertation, 2014.

[KBH+15] J. Koch, F. Brandl, A. Hofer, G. Reinhart: *Studie zum Änderungsmanagement in der Produktion.* München, Technische Universtität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Studie, 2015.

[KBR19] S. Kröger, H. Bauer, G. Reinhart: *Kostenstruktur zur Bewertung von Änderungsauswirkungen in der Produktion.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 114 (9), 2019, S. 530–534

[KCC+18] E.C.Y. Koh, N.H.M. Caldwell, P.J. Clarkson, others: *Defining system boundaries in change propagation analysis: A diesel engine case study.* In: *International Dependency and Structure Modeling (DSM) Conference,* S. 81–91, 2018.

[KGR16] J. Koch, A. Gritsch, G. Reinhart: *Process design for the management of changes in manufacturing: Toward a Manufacturing Change Management process.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 14, 2016, S. 10–19.

[KHJ+99] Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Pritschow, G. Ulsoy, H. van Brussel: *Reconfigurable Manufacturing Systems.* CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 48 (2), 1999, S. 527–540.

[KIE07] J. Kiefer: *Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau.* Saarbrücken, Universität des Saarlandes. Dissertation, 2007.

[KIMI04] Y. Kitamura, R. Mizoguchi: *Ontology-Based Functional-Knowledge Modeling Methodology and Its Deployment.* In: Motta (Hrsg.): *Engineering Knowledge in the Age of the Semantic Web.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 99–115, 2004.

[KKI+02] K. Kozaki, Y. Kitamura, M. Ikeda, R. Mizoguchi: *Hozo: An Environment for Building/Using Ontologies Based on a Fundamental Consideration of "Role" and "Relationship".* In: Gómez-Pérez (Hrsg.): *Knowledge Engineering and Knowledge Management: Ontologies and the Semantic Web.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 213–218, 2002.

[KKJ+13] K. Kernschmidt, P. Klein, N. Jazdi, P. Göhner, M. Weyrich, B. Vogel-Heuser: "*Methodology for identification of adaptive reusable modules in automated production systems"*. In Smart Product Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 125-135, 2013.

[KLE99] R.W. Kleedörfer: *Prozeß- und Änderungsmanagement der integrierten Produktentwicklung*. Als Ms. gedr. Aachen: Shaker, 1999 (Reihe Konstruktionstechnik München, Bd. 29).

[KMM+14] J. Koch, S. Maisenbacher, M. Maurer, G. Reinhart, M.F. Zäh: *Structural Modeling of Extended Manufacturing Systems – An Approach to Support Changeability by Reconfiguration Planning.* Procedia CIRP, Vol. 17, 2014, S. 142–147.

[KMR16] J. Koch, N. Michels, G. Reinhart: *Context Model Design for a Process-oriented Manufacturing Change Management.* Procedia CIRP, Vol. 41, 2016, S. 33–38.

[KOC17] J. Koch: *Manufacturing Change Management – a Process-Based Approach for the Management of Manufacturing Changes.* München, Technische Universität München. Dissertation, 2017.

[KOHO16] J. Koch, A. Hofer: *Änderungsmanagement in der Produktion: Herausforderungen und Anwendungen in der industriellen Praxis.* wt Werkstattstechnik online, Vol. 106 (7), 2016, S. 520–526.

[KPS11] F. Karl, J. Pohl, S. Schindler: *Umfrage - Beeinflussung der Produktion durch Zyklen.* iwb Newsletter, Vol. 19 (4), 2011, S. 7.

[KWW03] S. Kirchner, R. Winkler, E. Westkämper: Unternehmensstudie zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. wt Werkstattstechnik online, Vol. 93 (4), 2003, S. 254–260.

[KÖH09] C. Köhler: *Technische Produktänderungen: Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterung des CPM/PDD-Ansatzes.* Saarbrücken: Univ. des Saarlandes Lehrstuhl für Fertigungstechnik, 2009 (Schriftenreihe Produktionstechnik, 45).

[LAD18] J. Ladiges: *Automatisierte Bestimmung von Eigenschaften industrieller Produktionssysteme unter Einfluss evolutionärer Änderungen.* Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, 2018.

[LAN10] M. Lanz: *Logical and semantic foundations of knowledge representation for assembly and manufacturing processes.* Tampere, Tampere University of Technology. Dissertation, 2010.

[LFH+13] J. Ladiges, A. Fay, C. Haubeck, W. Lamersdorf: *Operationalized definitions of non-functional requirements on automated production facilities to measure evolution effects with an automation system.* In: *18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA),* S. 1–6, 2013.

[LFL16] J. Ladiges, A. Fay, W. Lamersdorf: *Automated Determining of Manufacturing Properties and Their Evolutionary Changes from Event Traces.* Intelligent Industrial Systems, Vol. 2 (2), 2016, S. 163–178.

[LHS+12] M. Loskyll, I. Heck, J. Schlick, M. Schwarz: *Context-Based Orchestration for Control of Resource-Efficient Manufacturing Processes.* Future Internet, Vol. 4 (4), 2012, S. 737–761.

[LIRE98] U. Lindemann, R. Reichwald: *Integriertes Änderungsmanagement.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998.

[LMB08] U. Lindemann, M. Maurer, T. Braun: *Structural complexity management: an approach for the field of product design: Springer Science & Business Media,* 2008.

[LMC+14] C. Legat, J. Mund, A. Campetelli, G. Hackenberg, J. Folmer, D. Schütz, M. Broy, B. Vogel-Heuser: *Interface Behavior Modeling for Automatic Verification of Industrial Automation Systems Functional Conformance*. at - Automatisierungstechnik, Vol. 62 (11), 2014.

[LWA+13] J. Ladiges, I. Wior, E. Arroyo, A. Fay: *Evolution of production facilities and its impact on non-functional requirements.* In: *2013 IEEE 11th International Conference on Industrial Informatics (INDIN): 29 - 31 July 2013, Bochum, Germany.* Piscataway, NJ: IEEE, S. 224–229, 2013.

[LWM+12] S. Langer, J. Wilberg, A. Maier, U. Lindemann: *Änderungsmanagement-Report 2012: Studienergebnisse zu Ursachen und Auswirkungen, aktuellen Praktiken, Herausforderungen und Strategien in Deutschland*, Technische Universität München, 2012.

[MaWe19] P. Marks and M. Weyrich, "*Agentenbasiertes Assistenzsystem zur Unterstützung bei der Anwendung der in FlexA entwickelten Methodik*", Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme, Universität Stuttgart, 2019.

[MBW+18] S. Malakuti, J. Bock, M. Weser, P. Venet, P. Zimmermann, M. Wiegand, J. Grothoff, C. Wagner, A. Bayha: *Challenges in Skill-based Engineering of Industrial Automation Systems**. In: 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vol. 1, S. 67–74, 2018.

[McG03] R.E. McGrath: *XML and Scientific File Formats.* In: *Seattle Annual Meeting,* 2003

[MHW+18] P. Marks, X.L. Hoang, M. Weyrich, A. Fay: *A systematic approach for supporting the adaptation process of discrete manufacturing machines*. Research in Engineering Design, Vol. 28 (4), 2018, S. 624–641.

[MiRe16] J. Michniewicz, G. Reinhart: *Cyber-Physical-Robotics – Modelling of modular robot cells for automated planning and execution of assembly tasks*. Mechatronics, Vol. 34, 2016, S. 170–180.

[MPG14] R. Mishra, A. Pundir, L. Ganapathy: *Manufacturing Flexibility Research: A Review of Literature and Agenda for Future Research*. Global Journal of Flexible Systems Management, Vol. 15 (2), 2014, S. 101–112.

[MWH+17] P. Marks, M. Weyrich, X.L. Hoang, A. Fay: *Agent-based adaptation of automated manufacturing machines*. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): IEEE, S. 1–8, 2017.

[MYW18] P. Marks, Q. Yu, M. Weyrich: *Survey on Flexibility and Changeability Indicators of automated Manufacturing Systems*. In: 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vol. 1, S. 516–523, 2018.

[NRA08] P. Nyhuis, G. Reinhart, E. Abele (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten*. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2008.

[OHB+18] H. Olmez, M. Hassannezhad, N. Ball, P.J. Clarkson: *Modelling change with an integrated approach to manufacturing system design.* In: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia; The Design Society, Glasgow, UK (Design Conference Proceedings), S. 611–622, 2018.

[OYL04] M.Z. Ouertani, L.G. Yesilbas, L. Lossent: *Engineering change process: state of the art, a case study and proposition of an impact analysis method*. In: 5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, IDMME 2004, S. 1–12, 2004.

[PaBe97] G. Pahl, W. Beitz: *Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung*. Vierte, neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997

[PAC12] J. Pachow-Frauenhofer: *Planung veränderungsfähiger Montagesysteme*. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum, 2012 (Berichte aus dem IFA).

[PBB+07] Pahl, W. Beitz et al. (Hrsg.): *Engineering Design: A Systematic Approach*. Third Edition. London: Springer-Verlag London Limited, 2007.

[PiEp94] T.U. Pimmler, S.D. Eppinger: *Integration analysis of product decompositions*. Cambridge, Mass.: Alfred P. Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, 1994

[PLE17] C. Plehn: *A Method for Analyzing the Impact of Changes and their Propagation in Manufacturing Systems.* München, Technische Universität München. Dissertation, 2017.

[PSB13] J. Pfrommer, M. Schleipen, J. Beyerer: *PPRS: Production skills and their relation to product, pro-cess, and resource*. In: 2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA), S. 1–4, 2013.

[PORU09] K. Pohl, C. Rupp: *Basiswissen Requirements Engineering: Aus- und Weiterbildung zum "Certified Professional for Requirements Engineering"; Foundation Level nach IREB-Standard*. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt-Verl., 2009.

[PSA+15] J. Pfrommer, D. Stogl, K. Aleksandrov, S. Escaida Navarro, B. Hein, J. Beyerer: *Plug & produce by modelling skills and service-oriented orchestration of reconfigurable manufacturing systems*. at - Automatisierungstechnik, Vol. 63 (10), 2015, S. 790–800.

[RAV+16] B. Ramis Ferrer, B. Ahmad, D. Vera, A. Lobov, R. Harrison, J.L. Martínez Lastra: *Product, process and resource model coupling for knowledge-driven assembly automation*. at - Automatisierungstechnik, Vol. 64 (3), 2016, S. 231–243.

[RBP11] L. Ribeiro, J. Barata, J. Pimentao: *Where evolvable production systems meet complexity science*. In: 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM), S. 1–6, 2011.

[REMO09] K.R. Reddi, Y.B. Moon: *A framework for managing engineering change propagation*. International Journal of Innovation and Learning, Vol. 6 (5), 2009, S. 461–476.

[RTC+05] R. Keller, T. Eger, Claudia Eckert, P. J. Clarkson: *Visualising change propagation.* In: *15th International Conference on Engineering Design (ICED05),* S. 1–16, 2005.

[SCDR09] M. Schleipen, R. Drath: *Three-view-concept for modeling process or manufacturing plants with AutomationML*. In: 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies Factory Automation, S. 1–4, 2009.

[SCGR08] W. Schorn, N. Große: *Hierarchien und Symbolik in der Produktionstechnik*. atp edition-Automatisierungstechnische Praxis, Vol. 50 (11), 2008, S. 66–74.

[SCH05] H. Schäfer: *Unternehmensinvestitionen: Grundzüge in Theorie und Management*. 2., überarbeitete Auflage. Heidelberg: Physica-Verlag Heidelberg, 2005.

[SCH02] K. Schmidt: *Methodik zur integrierten Grobplanung von Abläufen und Strukturen mit digitalen Fabrikmodellen*. Publikationsserver der RWTH Aachen, Dissertation, Aachen, 2002

[SCH18] A. Scholz: *Unterstützung des Engineerings von fertigungstechnischen Produktionssystemen mit Hilfe von Maschinenfunktionen: Methode, Modell und Beschreibungsmittel für ein funktionsorientiertes Planen.* Hamburg, Universitätsbibliothek der Helmut-Schmidt-Universität, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, 2018.

[SCH13] C.P. Schulze: *Planung und Bewertung von Fabrikstrukturen*. Garbsen: PZH-Verl., 2013 (Berichte aus dem IFA, 2013,4).

[SCH16] S. Schroeck: *Interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen*. Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, 2016.

[SESE90] A.K. Sethi, S.P. Sethi: *Flexibility in manufacturing: A survey: International Journal of Flexible Manufacturing Systems*. Int J Flex Manuf Syst, Vol. 2 (4), 1990, S. 289–328.

[SJF11] S. Schreiber, S. Jerentz, A. Fay: *Anforderungen an Steuerungskonzepte für moderne Fertigungsanlagen: Herausforderungen für dezentrale Ansätze in der Automaisierungstechnik*. In: Automation 2011, S. 7–11, 2011

[SFT+11] M. Strube, A. Fay, S. Truchat, H. Figalist: *Modellgestützte Modernisierungsplanung.* atp edition, Vol. 53 (07-08), 2011, S. 46–52.

[SISA18] L. Siddharth, P. Sarkar: *A Multiple-Domain Matrix Support to Capture Rationale for Engineering Design Changes.* Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 18 (2), 2018, 1-11.

[STI08] Stilian Stanev, Hardy Krappe, Hischam Abul Ola, Konstantinos Georgoulias, Nikolaos Papakostas, George Chryssolouris, Jivka Ovtcharova: *Efficient change management for the flexible production of the future*. Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 19 (6), 2008, S. 712–726.

[STR14] M. Strube: *Modellgestützte Modernisierungsplanung industrieller Automatisierungslösungen*. Hamburg, Universitätsbibliothek der Helmut-Schmidt-Universität, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, 2014.

[STST04] S. Staab, R. Studer (Hrsg.): *Handbook on Ontologies.* Berlin, Heidelberg: Springer (International Handbooks on Information Systems), 2004.

[SZH+13] S. Schröck, F. Zimmer, T. Holm, A. Fay, T. Jager: *Principles, viewpoints and effect links in the engineering of automated plants.* In: *IECON 2013: 39th annual conference of the IEEE Industrial Electronics Societ ; 10 - 13 Nov. 2013, Vienna, Austria ; proceedings.* Piscataway, NJ: IEEE, S. 6940–6945, 2013.

[TFD18] S. Thongnuch, A. Fay, R. Drath: *Semi-automatic generation of a virtual representation of a production cell.* at - Automatisierungstechnik, Vol. 66 (5), 2018, S. 372–384.

[TYU18] D. Tang, L. Yin, I. Ullah: *Matrix-Based Change Prediction and Analysis Method Considering Multiple Change Requirements.* In: *Matrix-based Product Design and Change Management.* Singapore: Springer Singapore, S. 145–183, 2018.

[USC18] M. Uschold: *Demystifying OWL for the enterprise.* San Rafael, California: Morgan & Claypool Publishers, 2018 (Synthesis digital library of engineering and computer science, #17).

[VFS+15] B. Vogel-Heuser, A. Fay, I. Schaefer, M. Tichy: *Evolution of software in automated production systems: Challenges and research directions.* Journal of Systems and Software, Vol. 110, 2015, S. 54–84.

[WALÖ10] T. Wagner, U. Löwen: *Modellierung: Grundlage für ein integriertes Engineering.* In: *Tagungsbad der "Automation 2010".* Baden-Baden, 2010.

[WCB+15] M. Wickel, N. Chucholowski, F. Behncke, U. Lindemann: *Comparison of Seven Company-Specific Engineering Change Processes*. In: Schabacker, Gericke et al. (Hrsg.): Modelling and Management of Engineering Processes: Proceedings of the 3rd International Conference 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 125–136, 2015.

[WEI14] T. Weilkiens: *Systems Engineering mit SysML/UML: Modellierung, Analyse, Design*. 3., überarb. u. akt. Aufl., rev. Ausg. Heidelberg, Neckar: dpunkt, 2014.

[WIE02] H.-P. Wiendahl: *Wandlungsfähigkeit-Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik*. wt Werkstattstechnik online, Vol. 92 (4), 2002, S. 122–127.

[WIHE04] H.P. Wiendahl, C.L. Heger: *Justifying Changeability. A Methodical Approach to Achieving Cost Ef-fectiveness*. Journal for Manufacturing Science and Production, Vol. 6 (1-2), 2004, S. 33–40.

[WKF14] M. Weyrich, P. Klein, F. Steden, "*Reuse of modules for mechatronic modeling and evaluation of manufacturing systems in the conceptual design and basic engineering phase*" in 19th IFAC World Congress (International Federation of Automatic Control) 24.-29.08.2014 Cape Town, South Africa, 2014.

[WEN+07] H.-P. Wiendahl, H.A. Elmaraghy, P. Nyhuis, M.F. Zäh, H.-H. Wiendahl, N. Duffie, M. Brieke: *Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation*. CIRP Annals, Vol. 56 (2), 2007, S. 783–809.

[WEZA09] E. Westkämper, E. Zahn: *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.

[WIL06] H. Wildemann: Änderungsmanagement: *Leitfaden zur Einführung eines effizienten Managements technischer Änderungen*. 14. Aufl. München: TCW-Verl., 2006

[WWB+14] M. Weyrich, I. Wior, D. Bchennati, A. Fay: *Flexibilisierung von Automatisierungssystemen: Syste-matisierung der Flexibilitätsanforderungen von Industrie 4.0*. wt Werkstattstechnik online (3), 2014, S. 106–111.

[YADU12] F. Yang, G.-j. Duan: *Developing a parameter linkage-based method for searching change propagation paths.* Research in Engineering Design, Vol. 23 (4), 2012, S. 353–372.

[YU15] L. Yu: *A developer's guide to the semantic web*. 2. ed., corrected 3. printing. Berlin: Springer, 2015.

[ZFB15] F. Zimmer, A. Fay, B. Böhm: *Engineering-Beziehungen als Konzept zur Modellierung von Abhängigkeiten und Werkzeug zur Aufwandsreduktion in der Planung*. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Automation, 2015.

[ZYZ19] Y.-j. Zheng, Y. Yang, N. Zhang: *A model for assessment of the impact of configuration changes in complex products.* Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 31 (1), 2019, S. 21.

[ZÖR88] G. Zörntlein: *Flexible Fertigungssysteme: Belegung, Steuerung, Datenorganisation*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1988.

Referenzierte Normen und Richtlinien

[DIN 8580] DIN 8580. *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung,* 01.09.2003.

[DIN EN 62424] DIN EN 62424. *Festlegung für die Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik in Fließbildern und für den Datenaustausch zwischen EDV- Werkzeugen zur Fließbilderstellung und CAE-Systemen,* 2008.

[DIN EN ISO 8000] DIN EN ISO 8000. *Größen und Einheiten*, 2013.

[IEC 61131] IEC 61131. *Grundlagen Speicherprogrammierbarer Steuerungen*, 2013

[VDA 4965] VDA 4965. *ECM Recommendation,* 2015.

[VDI 5200] VDI 5200. *Fabrikplanung*, 2011

[VDI 5201] VDI 5201. *Beschreibung und Messung der Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen,* 2017.

[VDI/VDE 3681] VDI/VDE 3681. *Einordnung und Bewertung von Beschreibungsmitteln aus der Automatisierungstechnik,* 2005.

[VDI/VDE 3682] VDI/VDE 3682. *Formalisierte Prozessbeschreibungen,* 05.2015.

Referenzierte Internetquellen

[AUT18@] AutomationML e. V.: *Whitepaper AutomationML Part 1 – AutomationML Architecture.* https://www.automationml.org/o.red/uploads/dateien/1542621846-Whitepaper%20AutomationML%20Edition%202.1%202018.zip [Abruf: 2020-04-12]

[OBJ15@] Object Management Group: *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™): Version 1.4.* https://sysml.org/.res/docs/specs/OMGSysML-v1.4-15-06-03.pdf [Abruf: 2020-04-12]

Veröffentlichungen des Verfassers

[HFM+17#] X.-L. Hoang, A. Fay, P. Marks, M. Weyrich: *Generation and impact analysis of adaptation options for automated manufacturing machines.* In: *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA):* IEEE, S. 1–8, 2017.

[HHF18#] X.-L. Hoang, C. Hildebrandt, A. Fay: *Product-oriented description of manufacturing resource skills.* IFAC-PapersOnLine, Vol. 51 (11), 2018, S. 90–95

[HMW+16#] X.-L. Hoang, P. Marks, M. Weyrich, A. Fay: *Systematization approach for the adaptation of manufacturing machines.* In: *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA): September 6-9, 2016 Berlin, Germany.* Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–4, 2016.

Studentische Arbeiten

[FEL18%] T. Felsenstein: *Analyse und Bewertung der Struktur von Abhängigkeitsmatrizen in Zusammenhang mit technischen Änderungen von Fertigungssystemen.* Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität, Institut für Automatisierungstechnik. Seminararbeit, 2018.

Anhang A: Modelle der Fallstudie 1

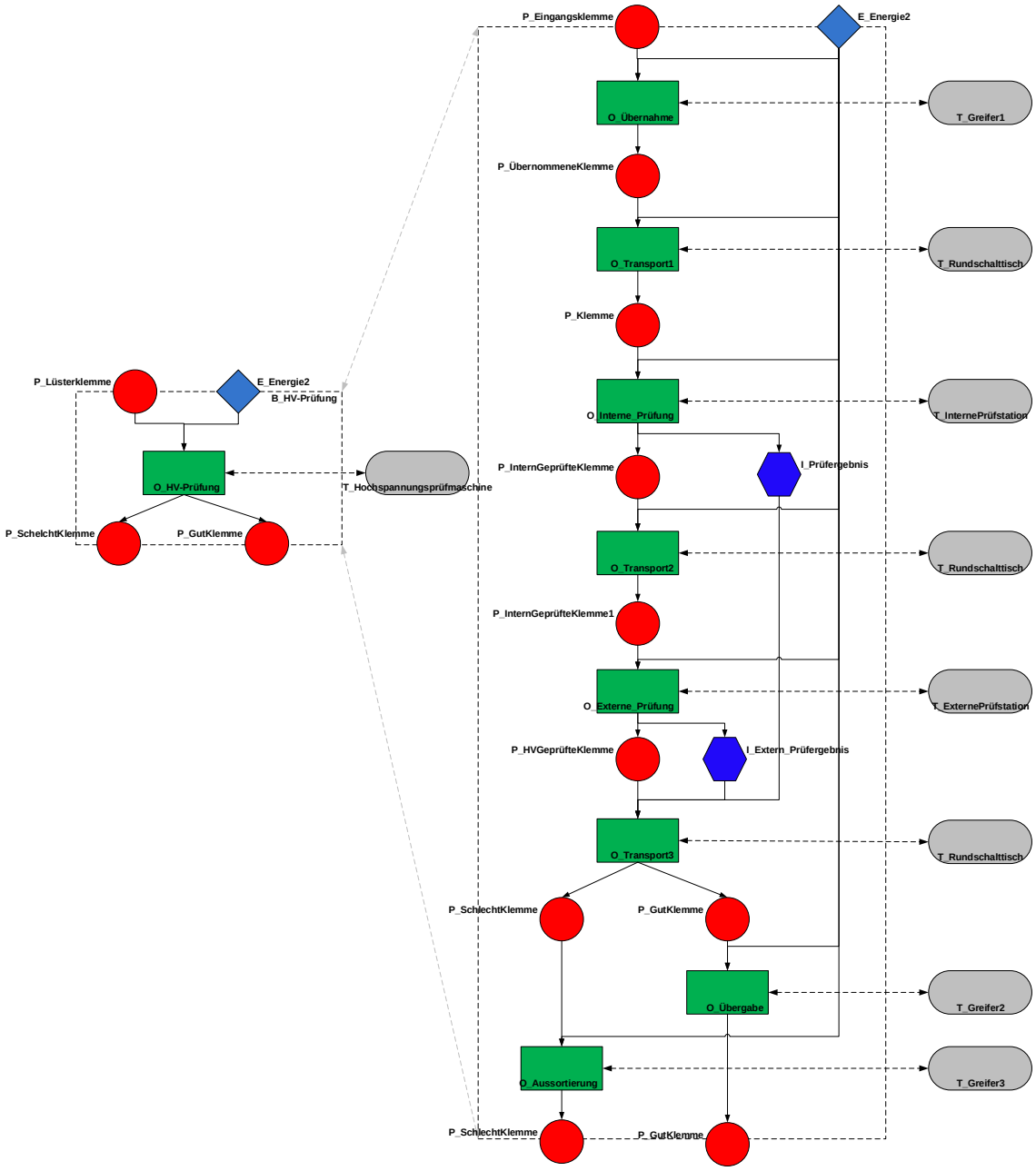

Abbildung A-1 Gesamtprozessablauf des betrachteten Hochspannungsprüfmaschine

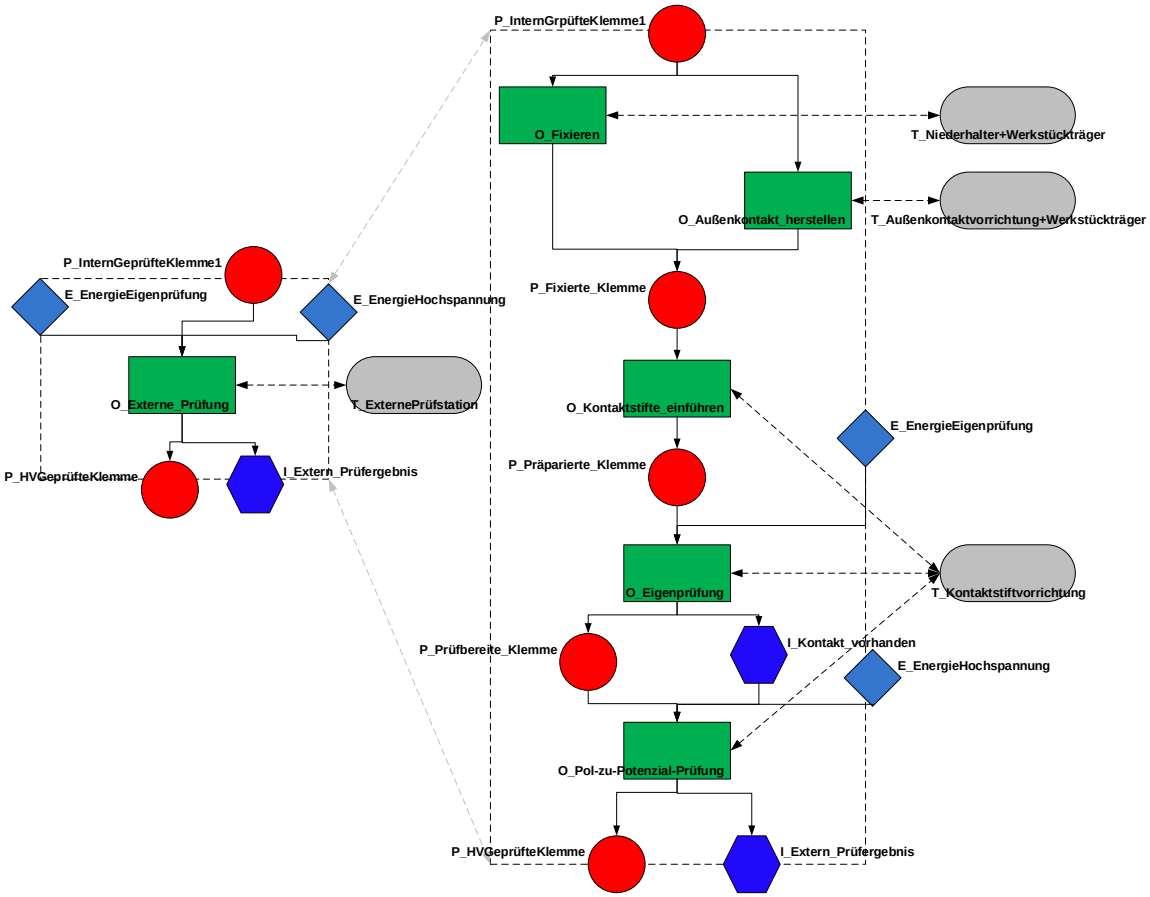

Abbildung A-2 Dekomposition des externen Prüfprozesses

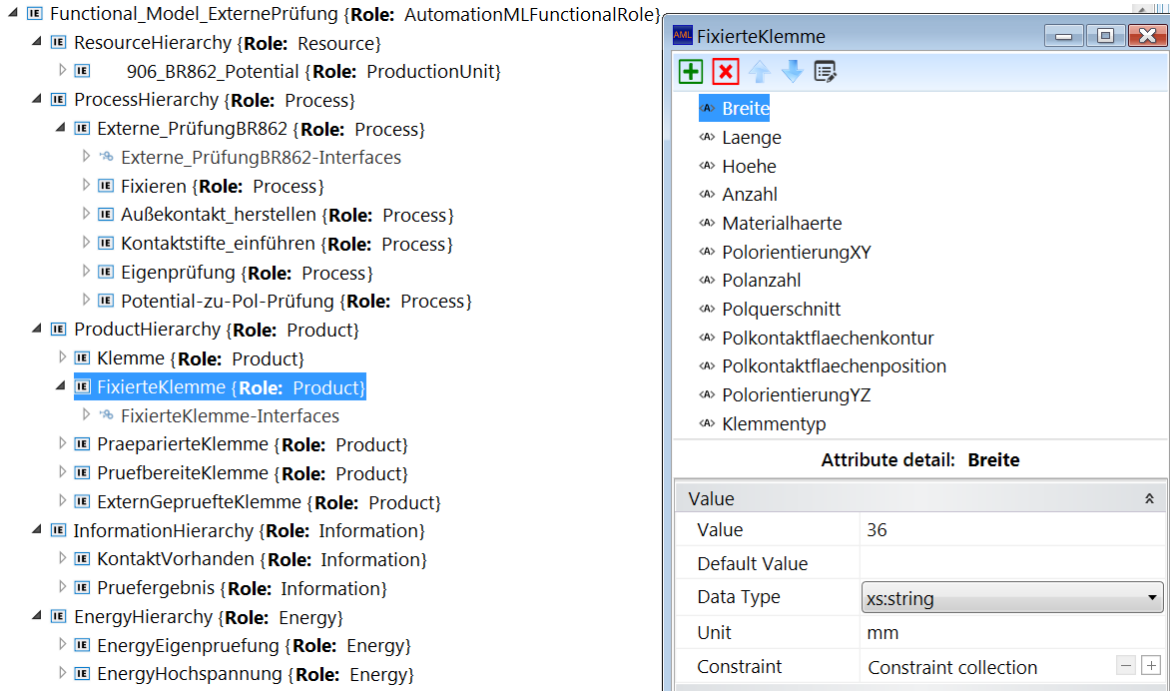

Abbildung A-3 Ausschnitt aus der Fähigkeitsbeschreibung der Externen-Prüfstation (906_BR862)

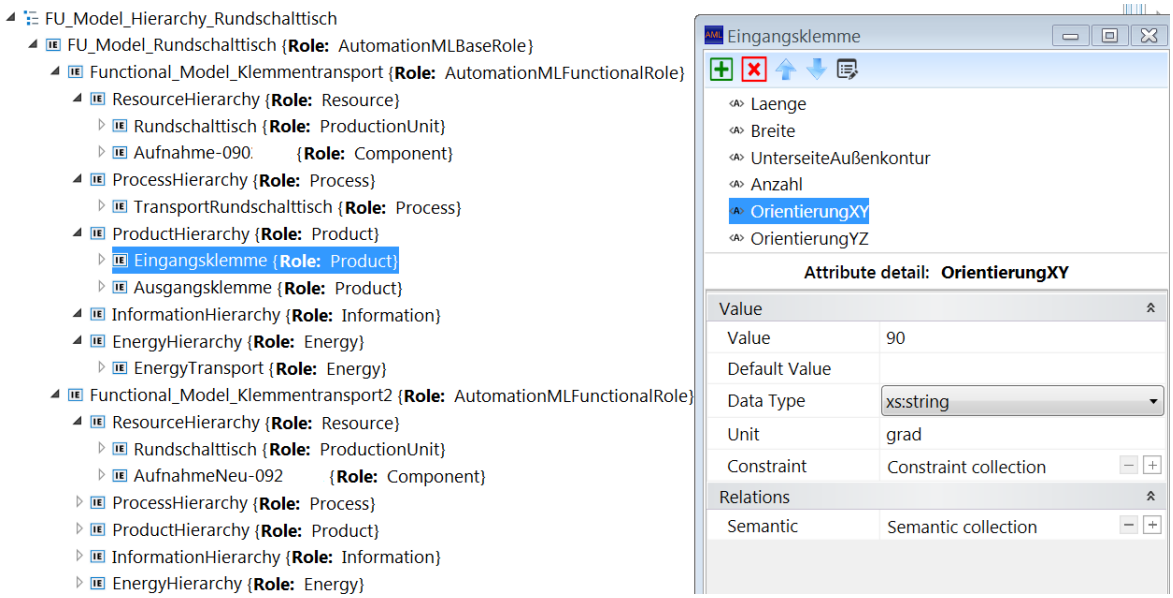

Abbildung A-4 Ausschnitt aus der Fähigkeitsbeschreibung des Rundschalttisches

Anhang B: Analyseergebnisse der Fallstudie 1

Initial Capability	Interne_PrüfungBR294(PolZuPol)	**Subsequent Capability**	206_BR294_PotentialZuPol_v02+Externe_PruefungBR294(PotentialZuPol)	**Overall Matching Result**	Partly OK		
Checked Output Element	**Parameter**	**Required Value**	**Checked Input Element**	**Parameter**	**Assurance Value**	**Matching Value**	**Result**
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Breite	28	(class fpbElements.Product) Klemme	Breite	28	28	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Laenge	10-166	(class fpbElements.Product) Klemme	Laenge	10-30	10.0-30.0	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Hoehe	18	(class fpbElements.Product) Klemme	Hoehe	18	18	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Materialhaerte	{hart;weich}	(class fpbElements.Product) Klemme	Materialhaerte	hart	hart	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	(class fpbElements.Product) Klemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	Serie1	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OberseiteAußenkontur	Serie1_ohne	(class fpbElements.Product) Klemme	OberseiteAußenkontur	Serie1_ohne	Serie1_ohne	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OrientierungXY	90	(class fpbElements.Product) Klemme	OrientierungXY	90	90	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OrientierungYZ	0	(class fpbElements.Product) Klemme	OrientierungYZ	0	0	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Anzahl	1-4	(class fpbElements.Product) Klemme	Anzahl	1-4	1.0-4.0	OK
(class fpbElements.Product) dummy	Eigenpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyEigenpruefung	Eigenpruefungsspannung	24-36		Nicht_relevant
(class fpbElements.Product) dummy	Potentialpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyHochspannung	Potentialpruefungsspannung	1000-2000		Nicht_relevant

Abbildung B-1 Änderungsbedarfsanalyse der Kombination der Fähigkeiten von *689_BR294* und *206_BR294*

Initial Capability	Interne_PrüfungBR294(PolZuPol)	**Subsequent Capability**	485_BR221_PotentialZuPol_v01+Externe_PruefungBR221(PotentialZuPol)	**Overall Matching Result**	Not OK		
Checked Output Element	**Parameter**	**Required Value**	**Checked Input Element**	**Parameter**	**Assurance Value**	**Matching Value**	**Result**
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Breite	28	(class fpbElements.Product) Klemme	Breite	22		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Laenge	10-166	(class fpbElements.Product) Klemme	Laenge	20	20	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Hoehe	18	(class fpbElements.Product) Klemme	Hoehe	10		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Materialhaerte	{hart;weich}	(class fpbElements.Product) Klemme	Materialhaerte	hart	hart	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	(class fpbElements.Product) Klemme	UnterseiteAußenkontur	Serie3		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OberseiteAußenkontur	Serie1_ohne	(class fpbElements.Product) Klemme	OberseiteAußenkontur	Serie3		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OrientierungXY	90	(class fpbElements.Product) Klemme	OrientierungXY	90	90	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OrientierungYZ	0	(class fpbElements.Product) Klemme	OrientierungYZ	90		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Anzahl	1-4	(class fpbElements.Product) Klemme	Anzahl	1-6	1.0-4.0	OK
(class fpbElements.Product) dummy	Eigenpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyEigenpruefung	Eigenpruefungsspannung	24-36		Nicht_relevant
(class fpbElements.Product) dummy	Potentialpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyHochspannung	Potentialpruefungsspannung	1000-2000		Nicht_relevant

Abbildung B-2 Änderungsbedarfsanalyse der Kombination der Fähigkeiten von *689_BR294* und *485_BR221*

Initial Capability	Interne_PrüfungBR294(PolZuPol)	**Subsequent Capability**	719_Rundschalttisch_Transport_v01+TransportRundschalttisch(Transport)	**Overall Matching Result**	Partly OK		
Checked Output Element	**Parameter**	**Required Value**	**Checked Input Element**	**Parameter**	**Assurance Value**	**Matching Value**	**Result**
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Breite	28	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	Breite	28	28	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Laenge	10-166	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	Laenge	10-166	10.0-166.0	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	Serie1	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OrientierungXY	90	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	OrientierungXY	90	90	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OrientierungYZ	0	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	OrientierungYZ	0	0	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Anzahl	1-4	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	Anzahl	1-4	1.0-4.0	OK
(class fpbElements.Product) dummy	Spannung		(class fpbElements.Energy) EnergyTransport	Spannung	240		Nicht_relevant

Initial Capability	Interne_PrüfungBR294(PolZuPol)	**Subsequent Capability**	719_Rundschalttisch_Transport_v01+TransportRundschalttisch2(Transport)	**Overall Matching Result**	Not OK		
Checked Output Element	**Parameter**	**Required Value**	**Checked Input Element**	**Parameter**	**Assurance Value**	**Matching Value**	**Result**
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Breite	28	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	Breite	36		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Laenge	10-166	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	Laenge	10-60	10.0-60.0	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	UnterseiteAußenkontur	Serie2		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OrientierungXY	90	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	OrientierungXY	180		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OrientierungYZ	0	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	OrientierungYZ	0	0	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Anzahl	1-4	(class fpbElements.Product) Eingangsklemme	Anzahl	1-4	1.0-4.0	OK
(class fpbElements.Product) dummy	Spannung		(class fpbElements.Energy) EnergyTransport	Spannung	240		Nicht_relevant

Abbildung B-3 Änderungsbedarfsanalyse der Kombination der Fähigkeiten von *689_BR294* und vom *Rundschalttisch*

Initial Capability	TransportRundschalttisch(Transport)	**Subsequent Capability**	906_BR862_PotentialZuPol_v01+Externe_PrüfungBR862(PotentialZuPol)	**Overall Matching Result**	Not OK		
Checked Output Element	**Parameter**	**Required Value**	**Checked Input Element**	**Parameter**	**Assurance Value**	**Matching Value**	**Result**
(class fpbElements.Product) Ausgangsklemme	Laenge	10-166	(class fpbElements.Product) Klemme	Laenge	60	60	OK
(class fpbElements.Product) Ausgangsklemme	Breite	28	(class fpbElements.Product) Klemme	Breite	36		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) Ausgangsklemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	(class fpbElements.Product) Klemme	UnterseiteAußenkontur	Serie2		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) Ausgangsklemme	Anzahl	1-4	(class fpbElements.Product) Klemme	Anzahl	1	1	OK
(class fpbElements.Product) Ausgangsklemme	OrientierungXY	90	(class fpbElements.Product) Klemme	OrientierungXY	180		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) dummy	Eigenpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyEigenpruefung	Eigenpruefungsspannung	24-36		Nicht_relevant
(class fpbElements.Product) dummy	Potentialpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyHochspannung	Potentialpruefungsspannung	1000-2000		Nicht_relevant

Initial Capability	TransportRundschalttisch(Transport)	**Subsequent Capability**	206_BR294_PotentialZuPol_v02+Externe_PruefungBR294(PotentialZuPol)	**Overall Matching Result**	Partly OK		
Checked Output Element	**Parameter**	**Required Value**	**Checked Input Element**	**Parameter**	**Assurance Value**	**Matching Value**	**Result**
(class fpbElements.Product) Ausgangsklemme	Laenge	10-166	(class fpbElements.Product) Klemme	Laenge	10-30	10.0-30.0	OK
(class fpbElements.Product) Ausgangsklemme	Breite	28	(class fpbElements.Product) Klemme	Breite	28	28	OK
(class fpbElements.Product) Ausgangsklemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	(class fpbElements.Product) Klemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	Serie1	OK
(class fpbElements.Product) Ausgangsklemme	Anzahl	1-4	(class fpbElements.Product) Klemme	Anzahl	1-4	1.0-4.0	OK
(class fpbElements.Product) Ausgangsklemme	OrientierungXY	90	(class fpbElements.Product) Klemme	OrientierungXY	90	90	OK
(class fpbElements.Product) Ausgangsklemme	OrientierungYZ	0	(class fpbElements.Product) Klemme	OrientierungYZ	0	0	OK
(class fpbElements.Product) dummy	Eigenpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyEigenpruefung	Eigenpruefungsspannung	24-36		Nicht_relevant
(class fpbElements.Product) dummy	Potentialpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyHochspannung	Potentialpruefungsspannung	1000-2000		Nicht_relevant

Abbildung B-4 Änderungsbedarfsanalyse der Kombination der Fähigkeiten vom *Rundschalttisch* und *906_BR862* sowie *206_BR294*

Initial Capability	Interne_PrüfungBR294(PolZuPol)	**Subsequent Capability**	906_BR862_PotentialZuPol_v01+Externe_PrüfungBR862(PotentialZuPol)	**Overall Matching Result**	Not OK		
Checked Output Element	**Parameter**	**Required Value**	**Checked Input Element**	**Parameter**	**Assurance Value**	**Matching Value**	**Result**
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Breite	28	(class fpbElements.Product) Klemme	Breite	36		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Laenge	10-166	(class fpbElements.Product) Klemme	Laenge	60	60	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Hoehe	18	(class fpbElements.Product) Klemme	Hoehe	21.5		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Materialhaerte	{hart;weich}	(class fpbElements.Product) Klemme	Materialhaerte	hart	hart	OK
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	(class fpbElements.Product) Klemme	UnterseiteAußenkontur	Serie2		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OberseiteAußenkontur	Serie1_ohne	(class fpbElements.Product) Klemme	OberseiteAußenkontur	Serie2_ohne		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	OrientierungXY	90	(class fpbElements.Product) Klemme	OrientierungXY	180		Nicht_erfuellt
(class fpbElements.Product) InternGeprueftеKlemme	Anzahl	1-3.32	(class fpbElements.Product) Klemme	Anzahl	1	1	OK
(class fpbElements.Product) dummy	Eigenpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyEigenpruefung	Eigenpruefungsspannung	24-36		Nicht_relevant
(class fpbElements.Product) dummy	Potentialpruefungsspannung		(class fpbElements.Energy) EnergyHochspannung	Potentialpruefungsspannung	1000-2000		Nicht_relevant

Abbildung B-5 Änderungsbedarfsanalyse der Kombination der Fähigkeiten von *689_BR294* und *906_BR862* unter Berücksichtigung des geforderten Eingangsprodukts

Anhang C: Modelle der Fallstudie 2

Einschuss	R Motor Drehmoment	R Motor Drehzahl	R Getriebe Uebersetzung	R Rollen Radien	R Rollen Reibwert	R Rollen Rollenabstand	P Einschuss max.Gewicht	P Einschuss zul.Breite	P Einschuss Beschl.Normalkraft	P Einschuss Geschwindigkeit	Prod_I Produktstab xDurchmesser	Prod_I Produktstab Gewschwindigkeit	Prod_I Produktstab Flaechengewicht	Prod_I Produktstab Elastizitaet	Prod_I Produktstab Rollreibungswert	Prod_O EingelagerterProduktstab xDurchmesser
R Motor Drehmoment																
R Motor Drehzahl																
R Getriebe Uebersetzung																
R Rollen Radien																
R Rollen Reibwert																
R Rollen Rollenabstand																
P Einschuss max.Gewicht	+		+	+												
P Einschuss zul.Breite						+								+		
P Einschuss Beschl.Normalkraft					+	-					+				+	
P Einschuss Geschwindigkeit		+	+	+												
Prod_I Produktstab xDurchmesser								=;+								
Prod_I Produktstab Gewschwindigkeit										<;+						
Prod_I Produktstab Flaechengewicht							<;+									
Prod_I Produktstab Elastizitaet																
Prod_I Produktstab Rollreibungswert																
Prod_O EingelagerterProduktstab xDurchmesser								+								

Abbildung C-1 MDM der Teilfähigkeit *Einschuss* der automatisierten Zigarettenmaschine

Zusammenfuehren	R Finger xDurchmesser	R Finger yDurchmesser	R Formatband Antrieb	P Zusammenfuehren zul.xDurchmesser	P Zusammenfuehren zul.yDurchmesser	P Zusammenfuehren Geschwindigkeit	Prod_I BeleimtesPapier Dicke	Prod_I BeleimtesPapier Elastizitaet	Prod_I Tabakstrang xDurchmesser	Prod_I Tabakstrang yDurchmesser
R Finger xDurchmesser										
R Finger yDurchmesser										
R Formatband Antrieb										
P Zusammenfuehren zul.xDurchmesser	+									
P Zusammenfuehren zul.yDurchmesser		+						+		
P Zusammenfuehren Geschwindigkeit			+					+		
Prod_I BeleimtesPapier Dicke				<;+	<;+					
Prod_I BeleimtesPapier Elastizitaet										
Prod_I Tabakstrang xDurchmesser				<;+	<;+					
Prod_I Tabakstrang yDurchmesser										

Abbildung C-2 MDM der Teilfähigkeit *Zusammenführung* der automatisierten Zigarettenmaschine

Splicen	R Bobine Federkonstante	R Bobine Federweg	R Bobine LanglochLaenge	R Antriebsrolle Reibungswert	R Antriebsrolle Durchmesser	R Getriebe Uebersetzung	R Anpressrolle Federkraft	R Anpressrolle Masse	R Motor Drehzahl	R Motor Drehmoment	R Messer Anpresskraft	R Messer Keilwinkel	P Splicen Federkraft	P Splicen Beschl.Zugkraft	P Splicen Beschleunigung	P Splicen Beschleunigungszeit	P Splicen Endgeschwindigkeit	P Splicen Schneidkraft	Prod_I Papier Zugfestigkeit	Prod_I Papier Rollreibungswert	Prod_I Papier Dicke	Prod_O PapierSliced Zielgeschwindigkeit
R Bobine Federkonstante																						
R Bobine Federweg			<;+																			
R Bobine LanglochLaenge																						
R Antriebsrolle Reibungswert																						
R Antriebsrolle Durchmesser																						
R Getriebe Uebersetzung																						
R Motor Drehzahl																						
R Motor Drehmoment																						
R Anpressrolle Federkraft																						
R Anpressrolle Masse																						
R Messer Anpresskraft																		+				
R Messer Keilwinkel																		-				
P Splicen Federkraft	+	+												<;+								
P Splicen Beschl.Zugkraft				+	-	+		+	+	+			>;+									
P Splicen Beschleunigung														+								
P Splicen Beschleunigungszeit																						
P Splicen Endgeschwindigkeit					+	-	+								+	+						
P Splicen Schneidkraft											+	-										
Prod_I Papier Zugfestigkeit													>;+	>;+				<;+				
Prod_I Papier Rollreibungswert																						
Prod_I Papier Dicke																		<;+				
Prod_O PapierSliced Zielgeschwindigkeit																	=;+					

Abbildung C-3 MDM der Teilfähigkeit *Splicen* der automatisierten Zigarettenmaschine

Anhang D: Modelle der Fallstudie 3

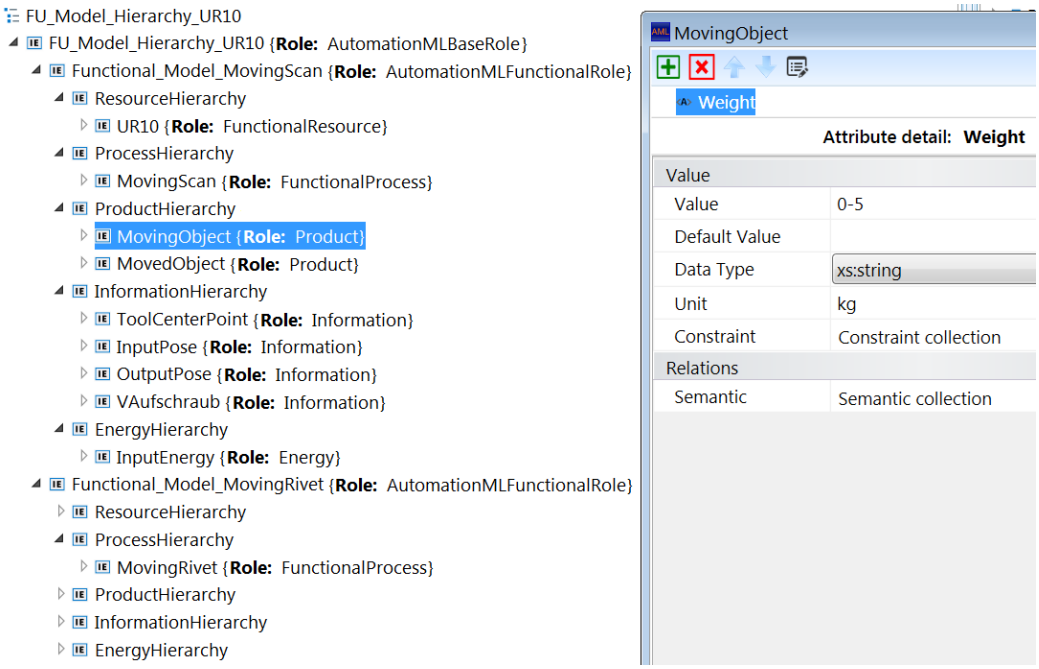

Abbildung D-1 Fähigkeitsmodells des UR10

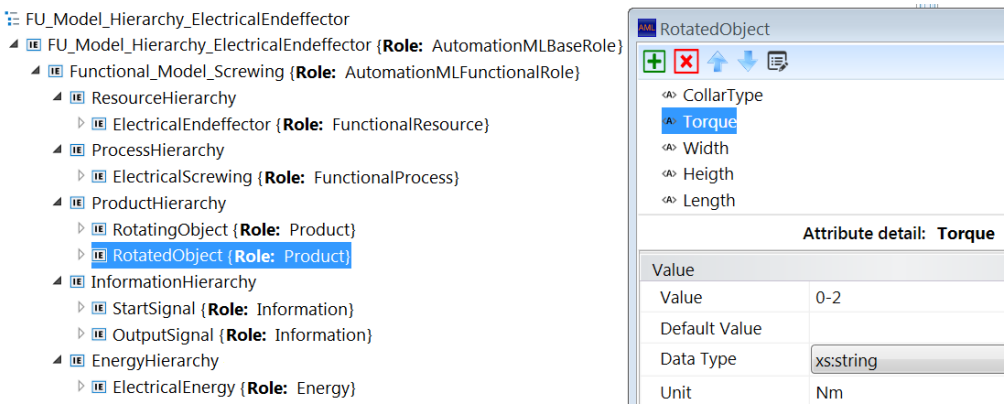

Abbildung D-2 Fähigkeitsmodells des elektrischen Endeffektors

Screwing	R ElectricalEndeffector maxTorque	R ElectricalEndeffector TorqueVariable	R Attachment Width	R Attachment Height	R Attachment Length	R Attachment Shape	P Screwing feasibleCollarType	P Screwing feasibleWidth	P Screwing feasibleHeigth	P Screwing feasibleLength	P Screwing feasibleTorque	Prod_I RotatingObject CollarType	Prod_I RotatingObject Width	Prod_I RotatingObject Heigth	Prod_I RotatingObject Length	Prod_O RotatedObject Torque	Prod_O RotatedObject CollarType	Prod_O RotatedObject Width	Prod_O RotatedObject Heigth	Prod_O RotatedObject Length
R ElectricalEndeffector maxTorque																				
R ElectricalEndeffector TorqueVariable	<;+																			
R Attachment Width																				
R Attachment Height																				
R Attachment Length																				
R Attachment Shape																				
P Screwing feasibleCollarType						0														
P Screwing feasibleWidth			+																	
P Screwing feasibleHeigth				+																
P Screwing feasibleLength					+															
P Screwing feasibleTorque		+																		
Prod_I RotatingObject CollarType							=;0													
Prod_I RotatingObject Width								=;+												
Prod_I RotatingObject Heigth									=;+											
Prod_I RotatingObject Length										=;+										
Prod_O RotatedObject Torque											+									
Prod_O RotatedObject CollarType							0													
Prod_O RotatedObject Width								+												
Prod_O RotatedObject Heigth									+											
Prod_O RotatedObject Length										+										

Abbildung D-3 Abhängigkeitsmodell des elektrischen Endeffektors

Scan	R MicroEpsilonSensor zAxisMeasuringRange	R MicroEpsilonSensor xAxisMeasuringRange	R MicroEpsilonSensor zMountingPosition	R MicroEpsilonSensor yMountingPosition	P Scan feasibleZDistance	P Scan feasibleXDistance	P Scan processzOffset	P Scan processyOffset	Prod_I FittingObject zDistance	Prod_I FittingObject Width	Info_I PositionArray zOffset	Info_I PositionArray yOffset
R MicroEpsilonSensor zAxisMeasuringRange												
R MicroEpsilonSensor xAxisMeasuringRange												
R MicroEpsilonSensor zMountingPosition												
R MicroEpsilonSensor yMountingPosition												
P Scan feasibleZDistance	+											
P Scan feasibleXDistance		+										
P Scan processzOffset			+									
P Scan processyOffset				+								
Prod_I FittingObject zDistance					=;+							
Prod_I FittingObject Width						=;+						
Info_I PositionArray zOffset							=;+					
Info_I PositionArray yOffset								=;+				

Abbildung D-4 Abhängigkeitsmodell der Teilfähigkeit *Scan* des Micro-Epsilon-Sensorsystems