

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Produktentwicklung

Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen

Martina Carolina Wickel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität
München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
2. Prof. Dr.-Ing. Christian Weber

Die Dissertation wurde am 29.06.2016 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen
am 09.05.2017 angenommen.

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Problemstellung

Die Komplexität technischer Produkte und Produktportfolios stellt für viele Unternehmen eine große Herausforderung dar. Im technischen Änderungsmanagement führt diese, aufgrund vielfältiger produkt- und prozessbezogener Abhängigkeiten, häufig zu unerwarteten Änderungsausbreitungen. Änderungen an einer Komponente führen zu Änderungen an weiteren Komponenten und breiten sich so innerhalb der Produktstruktur aus. Die Änderungsausbreitung kann zu erheblichen Mehrkosten und -aufwänden in der Entwicklung sowie zum Verlust der Wettbewerbsfähigkeit führen, wenn sie nicht rechtzeitig erkannt und berücksichtigt wird.

Unterdessen liegen umfangreiche Änderungsdaten in Unternehmen vor, die aufgrund regulatorischer Anforderungen erhoben und gepflegt werden müssen. Diese beinhalten umfassende Informationen über vergangene Änderungen und deren Auswirkungen. Derzeit werden diese allerdings kaum verwendet, wodurch eine erhebliche Ressource im Unternehmen ungenutzt bleibt.

Zielsetzung

Die zentrale Zielsetzung vorliegender Arbeit ist die Verbesserung des strategischen und operativen Umgangs mit technischen Änderungen in der Entwicklung von komplexen technischen Systemen, indem Erkenntnisse über Änderungsabhängigkeiten aus ähnlichen Produktentwicklungen gewonnen und berücksichtigt werden. Hierbei steht zunächst die Identifikation, Quantifizierung und Modellierung änderungsbedingter Abhängigkeiten durch Nutzung der Änderungsdaten im Vordergrund. Diese werden nachfolgend analysiert, um in neuen Entwicklungsprojekten weniger, frühere, effizientere und effektivere Änderungen zu erlangen.

Ergebnisse

Das wesentliche Ergebnis dieser Arbeit ist eine Methodik zur Analyse technischer Änderungen in komplexen Produkten und Produktportfolios. Die Methodik umfasst ein Vorgehen zur Identifikation und Modellierung von änderungsbedingten Abhängigkeiten und verwendet hierbei u. a. Data Mining Verfahren. Über einen semi-automatischen Prozess werden quantifizierte Abhängigkeiten aus umfangreichen Änderungsdaten erhoben, Änderungshäufigkeiten ermittelt und mit Hilfe von Matrizen modelliert. Die Methodik beinhaltet zudem die Analyse der modellierten Änderungsabhängigkeiten zur zielgerichteten Vermeidung und Vorverlagerung sowie zur effektiven und effizienten Durchführung von Änderungen in neuen Entwicklungsprojekten. Im Fokus der Vermeidung und Vorverlagerung stehen aus der Änderungsstruktur hervorgehende hochvernetzte und häufig geänderte Komponenten, auf deren strukturelles Verhalten über verschiedene Maßnahmen Einfluss genommen werden kann. Zudem wird der laufende Änderungsprozess bei der Bestimmung des Änderungsumfangs und der Auswirkungen unterstützt, indem basierend auf ermittelten Ausbreitungswahrscheinlichkeiten betroffene Komponenten vorgeschlagen werden. Für die technische Umsetzung ist eine Einbindung in bestehende

Workflow-Systeme vorgesehen, wodurch auf getätigte Änderungseingaben zurückgegriffen wird und, unterstützt durch selbstlernende Algorithmen, die Vorschläge zur Änderungsausbreitung stetig verbessert werden. Dadurch wird ein verbesserter Umgang mit technischen Änderungen in Unternehmen erzielt.

Folgerungen für die industrielle Praxis

Mit der Anwendung der Methodik zur Analyse technischer Änderungen wird das Verständnis über Änderungen sowie deren Abhängigkeiten in Unternehmen erhöht. Es wird ein umfassender Überblick über Änderungen in komplexen Produkten und Produktportfolios gewonnen sowie Zusammenhänge, die zur Änderungsausbreitung führen, quantifiziert und modelliert. Letztere Informationen werden in einer Vielzahl an Aktivitäten in Entwicklungsprozessen benötigt bspw. bei einer FMEA (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse), in der Konzeptphase neuer Produkte oder in neuen Änderungsvorhaben. Basierend auf der Analyse der Abhängigkeiten werden Unternehmen konkrete Handlungsbedarfe zur Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen in neuen Entwicklungsprojekten aufgezeigt. Zudem ist die Vorhersage der Änderungsausbreitung in bestehende Workflow-Systeme integrierbar, die bei stabilen Produktstrukturen eine erfolgreiche und automatisierte Prognose ermöglicht.

Folgerungen für Forschung und Wissenschaft

Die Methodik beruht als einer der wenigen Ansätze im Änderungsmanagement auf Data Mining Verfahren und Knowledge Discovery in Databases. Dies ermöglicht die automatische Analyse weit komplexerer technischer Systeme als bisher und auf einem detaillierten Level der Produktstruktur. Es werden erstmals automatisiert und datenbasiert quantifizierte Zusammenhänge in Form von Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten erhoben, um auf diese Weise Modelle der Änderungsausbreitung zu erstellen. Als Resultat steht eine Alternative zu den bisher interviewbasierten Erhebungen von Abhängigkeiten zur Verfügung. Die Methodik unterstützt ferner die ganzheitliche Analyse und Nutzung der identifizierten Zusammenhänge im Änderungsmanagement, insbesondere zur Realisierung der Vorverlagerung und Vermeidung von Änderungen sowie zur Steigerung der Effektivität und Effizienz im Änderungsprozess. Die durchgeführten Fallstudien konnten bereits eine erfolgreiche Anwendbarkeit der Methodik in der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie zeigen. Der Nutzen wurde hierbei sowohl für das Änderungsmanagement als auch für die Entwicklung als sehr hoch angesehen.

Die Methodik unterstützt das Änderungsmanagement hinsichtlich eines verbesserten Umgangs mit Änderungen, um in neuen Entwicklungen weniger, frühere, effektivere und effizientere Änderungen zu erhalten.

Garching, Mai 2017

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einführung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Forschungsmethodik und Erfahrungsgrundlage	3
1.4 Aufbau der Arbeit	6
2. Theoretische und begriffliche Grundlagen	9
2.1 Technische Änderungen – ein Bestandteil der Produktentwicklung	9
2.1.1 Charakterisierung technischer Änderungen	9
2.1.2 Technisches Änderungsmanagement	16
2.1.3 Strategien im technischen Änderungsmanagement	18
2.2 Umsetzung technischer Änderungen in Unternehmen	22
2.2.1 Änderungsprozesse	22
2.2.2 Informationstechnische Unterstützung von Änderungsprozessen	24
2.3 Daten technischer Änderungen	25
2.4 Methoden zur Bewertung von Änderungsauswirkungen	27
2.4.1 A priori Analyse von Änderungsauswirkungen	28
2.4.2 A posteriori Analyse von Änderungsauswirkungen	30
3. Methodische Grundlagen	31
3.1 Modellierung und Analyse von Produkt- und Änderungsstrukturen	31
3.1.1 Strukturelles Komplexitätsmanagement	31
3.1.2 Graphentheorie	34
3.1.3 Netzwerktheorie	36
3.2 Methoden zur datenbasierten Identifikation von Änderungsstrukturen	38
3.2.1 Data Mining & Knowledge Discovery in Databases	38
3.2.2 Data Mining Aufgaben und Verfahren	39
3.2.3 Assoziationsanalyse	41
3.3 Zwischenfazit	44

4. Anforderungen an den Ansatz	45
4.1 Vorgehen zur Anforderungsermittlung	45
4.2 Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik	45
5. Stand der Forschung und Technik	49
5.1 A priori Analyse der Änderungsausbreitung	49
5.1.1 Auswahl relevanter Ansätze zur a priori Analyse	49
5.1.2 Relevante Ansätze zur a priori Analyse	50
5.2 A posteriori Analyse der Änderungsausbreitung	52
5.2.1 Auswahl relevanter Ansätze zur a posteriori Analyse	52
5.2.2 Relevante Ansätze zur a posteriori Analyse	53
5.3 Gegenüberstellung der Ansätze zur Änderungsanalyse	55
5.4 Zwischenfazit zum Forschungsbedarf	57
6. Methodik zur datenbasierten Analyse der Änderungsausbreitung	59
6.1 Einführung und Überblick zur Methodik	59
6.2 Baustein 1: Vorgehen zur Erstellung des Änderungsstrukturmodells	61
6.2.1 Einführung zum Änderungsstrukturmodell	61
6.2.2 Vorgehen zur Erstellung des Änderungsstrukturmodells	62
6.3 Baustein 2: A posteriori Analyse der Änderungsstruktur	72
6.3.1 Anwendungsgebiet der a posteriori Analyse	73
6.3.2 A posteriori Analyse der Änderungsstruktur	74
6.4 Baustein 3: A priori Analyse der Änderungsausbreitung	87
6.4.1 Anwendungsgebiet der a priori Analyse	87
6.4.2 A priori Analyse der Änderungsausbreitung	88
6.5 Zusammenfassung der Methodik	95
7. Einsatz und Evaluation der Methodik	97
7.1 Konzept zur Evaluation	97
7.2 Fallstudie in der Automobilindustrie für drei Fahrzeugentwicklungsprojekte	98
7.2.1 Erstellung des Änderungsstrukturmodells	98
7.2.2 A posteriori Analyse der Änderungsstruktur	104
7.2.3 A priori Analyse der Änderungsausbreitung	106

7.3	Fallstudie in der Nutzfahrzeugbranche für drei Lebenszyklusphasen eines Motors	109
7.3.1	Erstellung des Änderungsstrukturmodells	110
7.3.2	A posteriori Analyse der Änderungsstruktur	112
7.3.3	A priori Analyse der Änderungsausbreitung	115
7.4	Anwendungsevaluation	116
7.5	Erfolgsevaluation	117
7.6	Bewertung der Anforderungserfüllung	123
7.7	Zusammenfassung der Evaluation	125
8.	Zusammenfassung & Ausblick	127
8.1	Zusammenfassung des Forschungsvorhabens	127
8.2	Ergebnisbeitrag für Forschung und Industrie	128
8.3	Limitationen der Methodik	129
8.4	Ausblick für weitere Forschungsaktivitäten	130
9.	Verzeichnisse	133
9.1	Abkürzungsverzeichnis	133
9.2	Literaturverzeichnis	135
9.3	Studienarbeitsverzeichnis	149
10.	Anhang	151
10.1	Ergänzungen zur Einführung	151
10.2	Ergänzungen zum Stand der Forschung und Technik	152
10.3	Ergänzungen zum Einsatz der Methodik und Evaluation	162

1. Einführung

„Daten sind das neue Öl.“

(Meglena Kuneva, EU-Politikerin 2009)

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Technische Änderungen sind ein wichtiger **Bestandteil der Produktentwicklung**, der heute mehr denn je einen entscheidenden Erfolgsfaktor für Unternehmen darstellt (Jarratt & Clarkson 2005, S. 264). Durch die zunehmenden Anforderungen von Kunden an die Individualisierung von Produkten sowie den kürzer werdenden Markt- und Innovationszyklen sind Unternehmen gefordert, innerhalb kürzerer Zeit und mit geringem Ressourcenaufwand neue und marktgerechte Produkte zu entwickeln. Dies setzt Agilität in den Unternehmen voraus, um auf Veränderungen und Abweichungen effizient reagieren zu können. In der Produktentwicklung stellen Änderungen daher seit jeher die Regel, nicht die Ausnahme dar (Clark & Fujimoto 1991, S. 121; Fricke et al. 2000, S. 169; Wasmer et al. 2011, S. 533).

Verschiedene Studien belegen, dass technische Änderungen mit einem erheblichen **Ressourcenaufwand** in der Entwicklung einhergehen, der zwischen 20 und 30 % der gesamten Entwicklungskapazität einnimmt (Fricke et al. 2000, S. 170; Langer et al. 2012, S. 7). Unter anderem ist hierfür die große Anzahl an technischen Änderungen, mit der Unternehmen umzugehen haben, verantwortlich. Ford, GM und DaimlerChrysler zählten bspw. innerhalb eines Jahres in ihrer Lieferantenkette insgesamt 350.000 Änderungen (Wasmer et al. 2011, S. 533). Ähnlich große Änderungszahlen in Entwicklungsprojekten sind in Elezi et al. (2011) und Giffin et al. (2009) dargelegt.

Die steigende **Komplexität von Produkten und Produktportfolios** (Schuh 2014) stellt zudem eine große Herausforderung für technische Änderungen dar, da vielfältige Abhängigkeiten zu teilweise unerwarteten Ausbreitungen führen können. Im ungünstigsten Fall führt die technische Änderung einer Komponente zu einer unerwarteten Kettenreaktion von Änderungen, die viele weitere Komponenten des Systems oder weiterer Systeme betreffen (Clarkson et al. 2004, S. 789). Diese Ausbreitungen können zu erheblichen Mehrkosten und -aufwänden sowie dem Verlust der Wettbewerbsfähigkeit führen, wenn sie nicht rechtzeitig erkannt und berücksichtigt werden (Chang 2002).

Innerhalb der Entwicklung komplexer technischer Systeme hat kaum eine einzelne Person einen **vollständigen Überblick über technische Änderungen** und deren Abhängigkeiten (Eckert et al. 2004, S. 9; Siddiqi et al. 2011, S. 1). Einzelne Entwickler kennen häufig nur Abhängigkeiten innerhalb von Teilsystemen, wohingegen das Management nur einen Überblick

über Zusammenhänge zwischen Teilsystemen hat. Eine Auswirkungsanalyse erfordert allerdings Kenntnisse über alle diese Abhängigkeiten und gilt daher als nicht triviale Aufgabe im Änderungsmanagement (Brown & Boucher 2007, S. 9; Wasmer et al. 2011).

Unterdessen bleiben **Produktstrukturen** und darin enthaltene **Abhängigkeiten** über verschiedene Produktgenerationen **relativ stabil**, da meist nur Teilsysteme von einer Neuentwicklung betroffen sind (Albers et al. 2015). Dies ermöglicht eine Übernahme von Abhängigkeiten in ähnlichen Entwicklungsprojekten, beispielsweise zur Bewertung der Änderungsauswirkung (Ahmad et al. 2010, S. 106; Clarkson et al. 2004, S. 789; Eckert et al. 2004).

Qualitätsstandards wie die DIN EN ISO 9001:2015 und das Produkthaftungsgesetz fordern eine gewissenhafte Dokumentation aller Änderungen (Feldhusen et al. 2012b, S. 102), wodurch umfangreiche **Änderungsdaten** entstehen, die auch Informationen über Änderungsauswirkungen und -ausbreitungen beinhalten und in **Änderungsdatenbanken** gespeichert werden. Nach aktuellen Expertenaussagen¹ werden diese in den Unternehmen allerdings kaum genutzt, wodurch eine vielversprechende Ressource ungenutzt bleibt.

Aus der steigenden Anzahl an technischen Änderungen in komplexen Systemen und der Notwendigkeit, Änderungsausbreitungen besser zu beherrschen, ergibt sich ein **Handlungsbedarf** bezüglich einer strategischen **Berücksichtigung von Änderungsabhängigkeiten** im Änderungsmanagement (Riviere et al. 2003, S. 7). Darüber hinaus sollten zudem die verfügbaren Ressourcen – d. h. die umfangreichen **Änderungsdatenbanken** mit ihren riesigen Datenmengen – zielgerichtet für ein verbessertes Änderungsmanagement genutzt werden.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit leitet sich unmittelbar aus der Problemstellung ab und unterstützt das übergeordnete Unternehmensziel nach wirtschaftlichem Handeln zur Erzielung eines Unternehmenserfolgs. Die **Zielsetzung** dieser Arbeit ist es neue Entwicklungsprojekte von komplexen technischen Systemen beim strategischen und operativen Umgang mit technischen Änderungen zu unterstützen, indem Erkenntnisse über Änderungsabhängigkeiten aus ähnlichen Produktentwicklungen gewonnen und berücksichtigt werden.

Daraus ergeben sich für diese Arbeit folgende **drei Teilziele**:

- Teilziel 1** Identifikation, Quantifizierung und Modellierung änderungsbedingter Abhängigkeiten in komplexen Produkt- und Portfoliostrukturen durch Nutzung historischer Änderungsdaten.
- Teilziel 2** Analyse der änderungsbedingten Abhängigkeiten zur effektiven Auswahl von Produktstrukturen, die in neuen Entwicklungen hinsichtlich einer Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen fokussiert werden sollten.
- Teilziel 3** Nutzung quantifizierter änderungsbedingter Abhängigkeiten zur Vorhersage möglicher Änderungsausbreitungen in Änderungsfällen, um einen effizienteren und effektiveren Änderungsprozess zu ermöglichen.

¹ Basierend auf Expertengesprächen im Rahmen der Vorarbeiten zu dieser Dissertation.

Durch **Teilziel 1** werden bestehende Änderungsabhängigkeiten in einer Produktstruktur transparent. Hierzu werden Änderungsdatenbanken verwendet, die in Unternehmen bereits vorhanden sind, deren Potenzial bisher jedoch kaum genutzt wird. Durch Ansätze des Data Mining können in Datenbanken Strukturen automatisiert identifiziert werden, sodass aufwendige Interviews und Expertenworkshops zur Erhebung von Abhängigkeiten überflüssig werden.

Teilziel 2 verfolgt die systematische Analyse änderungsbedingter Abhängigkeiten in der Produktstruktur, um kritische Strukturelemente (bspw. hochvernetzte Komponenten) zu identifizieren. Diese sollen in zukünftigen Entwicklungen mittels geeigneter Maßnahmen so beeinflusst werden, dass weniger und frühere Änderungen erforderlich bzw. möglich sind oder weniger änderungsbedingte Ausbreitungen entstehen. Dieses Teilziel zielt auf die Strategien der Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen ab.

Das **Teilziel 3** richtet sich an einen effektiven und effizienten Änderungsprozess, indem Vorschläge zu möglichen Änderungsausbreitungen angeboten werden. Diese basieren auf vergangenen Abhängigkeiten der jeweils zu ändernden Komponente. Die Bereitstellung solcher Informationen soll die Effizienz des Prozesses steigern, bspw. durch eine Vermeidung unnötiger Iterationen. Gleichzeitig soll eine verbesserte Entscheidungsgrundlage die Effektivität des Prozesses erhöhen, indem nur relevante Änderungen umgesetzt werden.

1.3 Forschungsmethodik und Erfahrungsgrundlage

Dieser Arbeit liegt ein forschungsmethodisches Vorgehen zugrunde, das das übergeordnete Ziel verfolgt, auf Basis valider Modelle und Theorien einen wiederum validen Unterstützungsansatz zu entwickeln (Blessing & Chakrabarti 2009, S. 9; Hevner & Chatterjee 2010). Da die Erfahrungsgrundlage der Autorin ebenfalls einen Einfluss auf den Ergebnisbeitrag hat, wird dieser zudem dargelegt.

Forschungsmethodik

Das forschungsmethodische Vorgehen in dieser Arbeit orientiert sich an der „Design Research Methodology (DRM)“ (Blessing & Chakrabarti 2009). Die DRM ist ein Rahmenwerk, das verschiedene unterstützende Methoden und Richtlinien bereitstellt, die je nach Forschungsvorhaben auszuwählen und anzuwenden sind (Blessing & Chakrabarti 2009, S. 10).

Abbildung 1-1 stellt die vier Phasen der DRM mit den grundlegenden Methoden und Ergebnissen dar. In der Anwendung der DRM haben sich sieben Typen etabliert, die sich in den Phasen und der Intensität der Bearbeitung unterscheiden (Blessing & Chakrabarti 2009, S. 60).



Abbildung 1-1: Forschungsmethodisches Vorgehen der DRM für Forschungstyp fünf nach Blessing & Chakrabarti (2009, S. 15)

Das Forschungsvorhaben dieser Dissertation beruht auf dem Forschungstyp fünf, der sich durch nachfolgend beschriebenen Phasen auszeichnet.

Die erste Phase dient der **Klärung des Forschungsziels** (RC, „Reserach Clarification“). Es wird zunächst ein grundlegendes Verständnis über die Ausgangssituation erarbeitet und anschließend das Forschungsziel der Arbeit abgeleitet. Dieses beschreibt eine zukünftige gewünschte Situation des Änderungsmanagements auf Basis der Problemstellung. Die Informationsgrundlage dieser Phase stützt sich insbesondere auf eine Literaturanalyse im Bereich Änderungsmanagement, Interviews mit verschiedenen Partnerunternehmen des Lehrstuhls für Produktentwicklung sowie Treffen des Industriearbeitskreises Änderungsmanagements².

In der **deskriptiven Studie I** (DS I) findet eine vertiefte Literaturanalyse hinsichtlich der festgelegten Forschungsziele statt. Bestehende Ansätze werden analysiert und hinsichtlich ihrer Erfüllung des Forschungsziels untersucht. Durch die Aufbereitung der methodischen Grundlagen wird eine Basis für die Entwicklung der Methodik geschaffen. Abschließend werden detaillierte Anforderungen an die Methodik formuliert.

Die Phase der **präskriptiven Studie** (PS) dient schließlich der Entwicklung der Methodik beruhend auf dem vertieften Verständnis der vorangegangenen Phasen und der Erfahrungsgrundlage der Autorin. Das Ergebnis wird anhand eines Software-Prototypen abgesichert, indem die Funktionsfähigkeit getestet sowie eine erste Evaluation hinsichtlich der Anforderungen durchgeführt wird.

Die **deskriptive Studie II** (DS II) stellt die Ergebnisse aus der Anwendung der Methodik in zwei Unternehmen dar. Auf Grundlage von Änderungsdaten aus sechs verschiedenen Entwick-

² Der Industriearbeitskreis Änderungsmanagement wurde im Jahr 2012 vom Lehrstuhl für Produktentwicklung ins Leben gerufen und dient dem intensiven Austausch zwischen Industrie und Forschung.

lungsprojekten und Serienbetreuungen werden änderungsbedingte Abhängigkeiten in den Produktstrukturen identifiziert und analysiert (Anwendungsevaluation). Über nachgelagerte Workshops und Interviews mit Mitarbeitern der Unternehmen aus dem Entwicklungs- und Änderungsmanagement wird ermittelt, inwiefern die Zielsetzung erreicht wurde (Erfolgsevaluation). Zusätzlich wird die Wiederverwendung von änderungsbedingten Abhängigkeiten in nachfolgenden Entwicklungsprojekten über eine Simulation evaluiert.

Erfahrungsgrundlage

Neben dem forschungsmethodischen Vorgehen hat die Erfahrungsgrundlage der Autorin einen möglichen Einfluss auf diese Arbeit. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit werden Erfahrungen aus Industrietätigkeit, Projekten in Forschung und Industrie sowie der in diesem Zusammenhang betreuten Studienarbeiten dargelegt.

Eine essentielle Erfahrungsgrundlage stellt die knapp **zweijährige Industrietätigkeit** bei MAN Truck & Bus dar, die der Tätigkeit am Lehrstuhl für Produktentwicklung vorausging. In dieser Zeit arbeitete die Autorin als Entwicklerin in der Dieselmotorenentwicklung. Dort war sie selbst in zahlreichen Änderungen involviert und nahm an Treffen von Änderungsgremien teil. Hierbei erhielt sie tiefgehende Einblicke in produkt- und prozessbezogene Zusammenhänge beim Umgang mit technischen Änderungen sowie hinsichtlich bestehender Herausforderungen in der industriellen Praxis.

Auf Seiten der Forschungsprojekte ist insbesondere die Tätigkeit im **Sonderforschungsbereich 768** „Zyklusmanagement von Innovationsprozessen“ hervorzuheben. Die Bearbeitung des Teilprojekts B1 „Zyklusorientierte Planung und Koordination von Entwicklungsprozessen“ erstreckte sich über die gesamten vier Jahre der zweiten Förderperiode (2012 – 2015) mit einem Fokus auf Änderungsauswirkungen und deren disziplinübergreifenden Modellierung.

Ausgehend von einer am Lehrstuhl für Produktentwicklung im Rahmen des SFB 768 durchgeführten Studie etablierte sich im Jahr 2012 der **Industriearbeitskreis Änderungsmanagement**. Dieser traf sich fortan regelmäßig unter der Leitung des Lehrstuhls um in Workshops relevante Themen aus Forschung und Industrie zu bearbeiten. Der Teilnehmerkreis umfasste jeweils fünf bis zehn Vertreter des Änderungs- und Entwicklungsmanagements aus unterschiedlichen Unternehmen und Branchen. Hierbei wurden wichtige Erkenntnisse bezüglich industrieller Herausforderungen im Änderungsmanagement gewonnen. Eine Auflistung der bearbeiteten Themenstellungen befindet sich im Anhang (Tabelle 10-1).

Einen wesentlichen Einfluss auf diese Forschungsarbeit hatte zudem der mehrmonatige **Forschungsaufenthalt** der Autorin am „Engineering Design Center (EDC)“ an der University of Cambridge. Dieser ermöglichte einen engen Austausch mit Prof. Clarkson und dessen Forschergruppe zum Thema Änderungsausbreitung und der „Change Prediction Method (CPM)“.

Weiterhin stellt die **Betreuung von Studienarbeiten** eine Erfahrungsgrundlage dieser Arbeit dar. Die Autorin gab die inhaltliche Ausrichtung der Arbeiten über die Aufgabenstellung vor und leitete deren Bearbeitung durch regelmäßige Abstimmungstreffen mit den Studierenden. In einem separaten Verzeichnis sind diese Arbeiten mit ihrem Hauptbeitrag für diese Arbeit aufgeführt (Kapitel 9.3).

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit leitet sich aus der gewählten Forschungsmethodik ab. Die Strukturierung der Kapitel und die Zuordnung zu den Forschungsphasen der DRM sind in Abbildung 1-2 zusammengefasst. Nachfolgend werden die einzelnen Kapitel kurz beschrieben.

Kapitel 1 beschreibt die Ausgangssituation dieser Dissertation sowie die Problemstellung im technischen Änderungsmanagement, woraus sich die Zielsetzung dieser Arbeit ableitet. Über die Forschungsmethodik wird die Vorgehensweise zur Zielerreichung beschrieben. Zudem wird die Erfahrungsgrundlage der Autorin dargelegt, um eine Nachvollziehbarkeit der Forschungsergebnisse zu ermöglichen.

Kapitel 2 dient der Einführung der theoretischen Grundlagen und definiert im Sinne dieser Arbeit relevante Begrifflichkeiten. Diese umfassen insbesondere technische Änderungen, das technische Änderungsmanagement, Änderungsprozesse sowie Änderungsdaten.

In **Kapitel 3** werden die methodischen Grundlagen erarbeitet. Diese sind für die Umsetzung der gewählten Methodik erforderlich und umfassen Modellierungsmethoden für Änderungsabhängigkeiten sowie Methoden zur Identifikation von Strukturen in großen Datenmengen.

In **Kapitel 4** werden, basierend auf Anforderungen aus wissenschaftlichen Publikationen sowie der industriellen Praxis, die Anforderungen an die Methodik aufgestellt.

Kapitel 5 stellt den für diese Arbeit relevanten Stand der Forschung und Technik dar. Es werden Ansätze zur a posteriori Analyse von Änderungsausbreitungen sowie Ansätze zur Vorhersage von Änderungsausbreitungen hinsichtlich der aufgestellten Anforderungen bewertet.

Kapitel 6 stellt die drei Bausteine der entwickelten Methodik dar. Der erste Baustein umfasst eine Vorgehensweise zur Erstellung von Änderungsstrukturmodellen aus bestehenden Änderungsdaten unter Einsatz von Data Mining Verfahren. Der zweite und dritte Baustein stellt Analysemöglichkeiten der Änderungsstruktur für das Änderungs- und Entwicklungsmanagement bereit. Die Analysen des zweiten Bausteins ermöglichen eine gezielte Vorverlagerung und Vermeidung von Änderungen in neuen Entwicklungsprojekten, während die Analysen des dritten Bausteins Änderungskoordinatoren bei der Bestimmung der Änderungsausbreitung unterstützen.

Kapitel 7 zeigt den Einsatz der Methodik in zwei Unternehmen und bewertet jeweils die Erfüllung der Forschungsziele. Abschließend werden der Ergebnisbeitrag und die Grenzen der Methodik für Industrie und Forschung diskutiert.

Kapitel 8 fasst den Ergebnisbeitrag der vorliegenden Dissertation für Industrie und Forschung zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsvorhaben im technischen Änderungsmanagement.

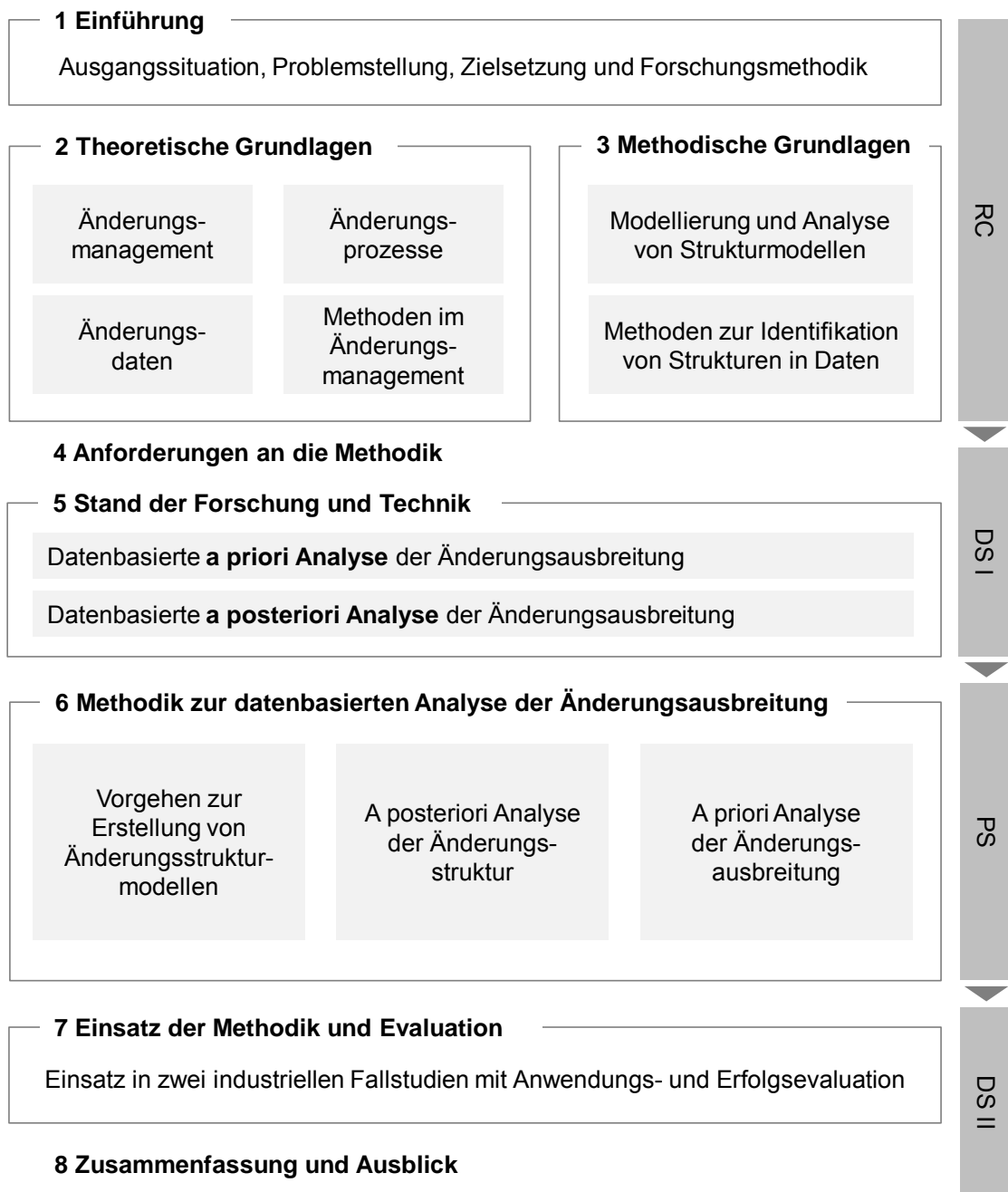


Abbildung 1-2: Aufbau der Dissertation und Zuordnung zu den Phasen der DRM

2. Theoretische und begriffliche Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zum Umgang mit technischen Änderungen beschrieben, um einen Überblick über den Forschungsgegenstand zu vermitteln und eine terminologische Basis zu schaffen. Es werden zunächst technische Änderungen, das Änderungsmanagement und der Änderungsprozess dargestellt und im Kontext dieser Arbeit definiert. Anschließend wird auf Änderungsdaten und Methoden zur Auswirkungsanalyse von Änderungen näher einzugehen.

2.1 Technische Änderungen – ein Bestandteil der Produktentwicklung

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben sind technische Änderungen die Regel und nicht die Ausnahme in der Produktentwicklung. Besonders bei innovativen und komplexen Produkten wird der Entwicklungsprozess von ständigen Änderungen begleitet (Fricke et al. 2000, S. 169–170). Durch Änderungen bestehender Produkte werden auch immer wieder, neue Produkte oder Varianten erzeugt (Eckert et al. 2009, S. 47–48).

Technische Änderungen können mit erheblichen Kostenerhöhungen und Verspätungen in der Entwicklung einhergehen, weshalb es wichtig ist, Änderungen zu verstehen und diese strategisch zu managen (Siddiqi et al. 2011). Nachfolgend wird aufbauend auf einer Definition und Charakterisierung technischer Änderungen (Kapitel 2.1.1) das technische Änderungsmanagement näher erläutert (Kapitel 2.1.2), um in Kapitel 2.1.3 die Strategien zum Umgang mit technischen Änderungen aufzuzeigen.

2.1.1 Charakterisierung technischer Änderungen

Technische Änderungen sind sehr vielschichtig und reichen von der einfachen Zeichnungsänderung bis hin zu umfangreichen Produktänderungen, die viele Komponenten eines Produkts betreffen (Jarratt et al. 2011, S. 104). Um die Begrifflichkeiten für technische Änderungen zu entwickeln, werden zunächst verbreitete Definitionen technischer Änderungen diskutiert und im Anschluss charakterisiert. Im Folgenden werden die Begriffe technische Änderung und Änderung synonym verwendet.

Technische Änderung

In der Literatur liegt kein einheitliches Verständnis über technische Änderungen vor. Selbst für den Begriff „technische Änderung“ gibt es teilweise abweichende Begriffe, wie beispielsweise „Produktänderung“ (Feldhusen et al. 2012b) oder in der englischen Literatur „engineering change“ oder „design change“ (Ollinger & Stahovich 2001). Die Definitionen unterscheiden sich je nach Autor hinsichtlich der Änderungsobjekte, die Umfang von Änderung sind. Diese sind auf Bauteile eines Produkts beschränkt (Wright 1997, S. 33, Huang & Mak 1999, S. 21, Huang et al. 2003, S. 481) oder schließen explizit Änderungen an Zeichnungen und Software ein (Jarratt & Clarkson 2005, S. 268, Terwiesch & Loch 1999, S. 160). Weiterhin wird teilweise spezifiziert, welche Änderungen an dem Änderungsobjekt vorgenommen werden. Beispiele

sind Modifikationen an der Form, Passung, Material, Abmaßen, Funktionen etc. (Huang & Mak 1999, S. 21, Huang et al. 2003, S. 481). Hamraz (2013) hingegen unterscheidet zwischen einer Änderung der Funktion, des Verhaltens oder der Struktur und orientiert sich hierbei am FBS Modell (Function-Behaviour-Structure Modell)³. In der DIN 6789-3:2011 werden technische Änderungen in Bezug zur Dokumentationssystematik definiert. Im Fokus stehen die Genehmigung von Änderungen sowie das Verständnis für technische Dokumente als eine Form von Produktmodellen.

Weitere Unterschiede liegen in der Zuordnung von technischen Änderungen zu bestimmten Lebenszyklusphasen des Produkts. Nach Wright (1997, S. 33) treten Änderungen erst ab der Produktionsphase auf, wodurch Änderungen in den Entwicklungsphasen nicht berücksichtigt werden. Huang & Mak (1999) berücksichtigen einen größeren Bereich, indem sie Modifikationen ab einem „Design release“ als Änderungen definieren. Zur Differenzierung von Änderungen gegenüber Iterationen, die in kreativen Prozessen zwingend notwendig sind, wird ebenfalls der Freigabestatus von Dokumenten und Entwicklungsständen verwendet. So entstehen Änderungen nur an bereits freigegeben Objekten (Terwiesch & Loch 1999, S. 160, Jarratt & Clarkson 2005, S. 268, Hamraz 2013, S. 20).

In keiner der Definitionen findet sich eine Spezifizierung hinsichtlich Größe, Umfang oder Herkunft einer Änderung. Technische Änderungen umfassen daher kleine Anpassungen einer Zeichnung ebenso wie große Produktüberarbeitungen (Jarratt et al. 2011).

Um dieser Arbeit eine möglichst weite Definition von technischen Änderungen zugrunde zu legen, wird die Definition von Jarratt & Clarkson (2005, S. 268) sowie Huang et al. (2003, S. 481) herangezogen und um einen Aspekt der Prozessorientierung erweitert, der in bestehenden Definitionen nur indirekt berücksichtigt wird:

Technische Änderungen sind Modifikationen an Produkten, Produktmodellen sowie zugehörigen Bestandteilen, unter Anwendung eines definierten Änderungsprozesses, nachdem diese für die weitere Entwicklung und Produktion freigegeben sind.

Gegenüber technischen Änderungen sind organisatorische Änderungen⁴ abzugrenzen. Diese adressieren Veränderungen von Strukturen und Prozessen und betreffen damit insbesondere die Aufbau- und Ablauforganisation eines Unternehmens (Bea & Göbel 2010). Technische Änderungen können zwar organisatorische Änderungen nach sich ziehen (vgl. Gemmerich 1995), diese sind allerdings nicht Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit.

³ Das FBS Modell, 1990 von John Gero veröffentlicht, sieht den Entwicklungsprozess als Transformation von Anforderungen (Function) in eine Produktbeschreibung (Structure). Zwischen Ausgangssituation und Ergebnis ist das Verhalten (Behaviour) einzuordnen (Vajna et al. 2009, S. 31).

⁴ Diese werden häufig auch mit Wandel, Umstrukturierung oder Veränderung umschrieben. Im Englischen besteht hierfür der Begriff „Change“, der teilweise auch Verwechslungen mit dem „Engineering Change“ hervorruft.

Eigenschaften technischer Änderungen

Technische Änderungen lassen sich durch verschiedene Eigenschaften charakterisieren. In der Literatur und industriellen Praxis wird zwischen diesen allerdings nicht immer ausreichend differenziert. Auslöser, Gründe und Ursachen von technischen Änderungen werden beispielsweise weitgehend synonym verwendet. In betrieblichen Änderungsbeschreibungen findet man unter der Rubrik Änderungsgrund häufig eine Auswahl typischer Probleme (z. B. Fertigungs-Montageproblem), typischer Ziele (z. B. Kostensenkung, Qualitätsverbesserung), inhaltlicher Schwerpunkte (z. B. Fertigungstechnik, Material) oder den initiiierenden Unternehmensbereich (z. B. Vertrieb, Produktion) (Ahmed-Kristensen & Kanike 2007, S. 7; Conrat Niemerg 1997, S. 51). Dies führt unter anderem dazu, dass keine sinnvollen Auswertungen durchgeführt werden können (Rowell et al. 2009, S. 8).

Nachfolgend wird auf wesentliche Eigenschaften von Änderungen eingegangen, die für das Verständnis dieser Arbeit von Bedeutung sind: Änderungsauslöser, Ursache, Grund und Auswirkungen von Änderungen.

Änderungen werden *ausgelöst*, wenn eine Abweichung zwischen Soll- und Ist-Eigenschaften eines Produkts oder einer Komponente erkannt und als gravierend eingestuft wird. Diese Soll/Ist-Abweichung kann auf zwei generelle Ausprägungsformen zurückgeführt werden (Conrat Niemerg 1997, S. 52):

- Entweder weicht eine ermittelte Ist-Eigenschaft von der Soll-Eigenschaft im Entwicklungsprozess ab. Dann liegt eine Nicht-Erfüllung der Anforderungen oder ein Fehler als Änderungsauslöser vor, z. B. eine Kostenüberschreitung oder ein Fertigungsproblem.
- Die definierten Soll-Eigenschaften haben sich nach Freigabe geändert. Dadurch ist eine Veränderung oder Neuerung der Anforderungen als Änderungsauslöser aufgetreten, z. B. eine neue Kundenanforderung oder eine neue Gesetzesvorgabe.

Mit dieser Unterscheidung geht die Differenzierung nach initiierten Änderungen, die durch neue Kundenanforderungen hervorgerufen werden, und auftretenden Änderungen, die als Reaktion auf bestehende Produktschwächen eingeleitet werden, einher (Eckert et al. 2004, S. 2). Darüber hinaus können auch Änderungen selbst weitere Änderungen auslösen, indem diese Ist-Eigenschaften eines Produkts oder einer Komponente so beeinflussen, dass die geforderten Soll-Eigenschaften nicht mehr erfüllt werden.

Das Vorliegen einer Soll/Ist-Abweichung ist noch kein hinreichender *Grund* für eine Änderung. Erst durch eine wirtschaftliche Bewertung der Änderung, die eine Verbesserung der Verkaufsfähigkeit des Produkts oder erhöhte Verkaufserlöse durch Reduktion der Gesamtaufwendungen nachweist, kann eine Änderung begründet werden (DIN 6789-3:2011, S. 2). Es wird zwischen zwei Änderungsgründen unterschieden (Conrat Niemerg 1997, S. 53):

- Zwingende Gründe (z. B. Sicherheitsvorgaben, Gesetzesvorgaben)
- Wirtschaftliche Gründe (z. B. Kosteneinsparung und/oder Ertragssteigerung)

Einige Autoren differenzieren daher zwischen Muss- und Kann-Änderungen (bspw. Belener 2008; Gemmerich 1995; Gille 2013; Lindemann & Reichwald 1998), wobei letztere insbesondere hinsichtlich einer betriebswirtschaftlichen Analyse und unter dem Aspekt einer möglichen Vermeidung interessant sind. In der englischsprachigen Literatur unterscheidet Jarratt (2004,

S. 36) zwischen Gründen zur Fehlerbehebung oder Produktverbesserung, worin allerdings keine wirtschaftliche Bewertung berücksichtigt ist.

Ursachen von Änderungen hingegen beschreiben kausale Hintergründe, die zu einer Soll/Ist-Abweichung führen. Basierend auf einer Literaturstudie bilden Lee et al. (2006, S. 376) sechs Kategorien für Ursachen: Flüchtigkeitsfehler, mangelnde Kommunikation, Änderungsausbreitung, Kosteneinsparungspotenziale, Vereinfachung des Herstellungsprozesses und Verbesserungen des Produkts. Häufige Ursachen in der Industrie sind Konstruktionsoptimierungen, neue Kunden-/Marktanforderungen, die Erschließung von Optimierungspotenzialen in der Fertigung, die Einführung neuer Lieferanten, die Abkündigung von Produkten oder eine Verlagerung von Produktionsstandorten (Feldhusen et al. 2012b, S. 111).

Eine breitangelegte Studie mit Teilnehmern aus 90 Unternehmen zeigte, dass eine unzureichende Anforderungsklä rung und menschliches Versagen in der Prozessausführung die häufigsten Ursachen von Änderungen sind (Maier & Langer 2011, S. 14). Conrat Niemerg (1997, S. 54) unterscheidet grundsätzlich zwei Arten von Änderungsursachen entsprechend ihrer Entstehung durch Fehler im Entwicklungsprozess und Neuerungen bei Rahmenbedingungen. Diese lassen sich auch den zuvor genannten Ursachen zuordnen.

Daraus resultieren für diese Arbeit zwei Typen von Änderungen, basierend auf ihren Ursachen:

***Fehlerbedingte Änderungen** sind auf Fehler im Entwicklungsprozess zurückzuführen (z. B. Nicht-Erfüllung von Anforderungen oder mangelnde Kommunikation).*

***Neuerungsbedingte Änderungen** sind auf Veränderungen im Umfeld zurückzuführen, die eine Neuerung der Entwicklungsaufgabe bedingen (z. B. durch neue Technologien, Gesetze, Marktanforderungen oder Vereinfachungen des Herstellungsprozesses).*

Die richtige Zuordnung der Änderungstypen erfordert eine genaue Kenntnis über die tatsächliche Ursache einer Änderung. Beispielsweise kann eine Änderung durch eine neue Kundenvorgabe ausgelöst werden, die sich allerdings auf eine ungenaue Anforderungserhebung zurückführen lässt (Conrat Niemerg 1997, S. 54).

Auswirkungen technischer Änderungen

Die *Auswirkungen* technischer Änderungen sind vielfältig – dies spiegelt sich auch in der Literatur wider. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über das Verständnis von Änderungsauswirkungen unterschiedlicher Autoren und stellt eine erste Kategorisierung dieser bereit.

Im Verständnis dieser Arbeit dienen die Kategorien Produkte, Prozesse und Ressourcen der Identifikation von Änderungsauswirkungen, während die Kategorien Qualität, Zeit und Kosten vorrangig zur Bewertung eben dieser eingesetzt werden (vgl. Wickel et al. 2014).

Tabelle 2-1: Auswirkungs- und Bewertungskategorien von technischen Änderungen

Autoren	Auswirkung			Bewertung		
	Produkt	Prozess	Ressourcen	Qualität	Zeit	Kosten
Gemmerich 1995	Objekt-bezogen	Verrichtungs-bezogen	-	-	Zeit-bezogen	Wert-bezogen
Conrat Niemerg 1997	-	-	Human-ressourcen	Qualität	Zeit	Kosten
Kleedörfer 1998	Im Produkt	Ablauf-organisatorisch	Aufbau-organisatorisch	-	-	Kosten
Gille 2013	-	-	-	Qualität	Zeit	Kosten
Hamraz 2013	-	-	-	Produkt-qualität	Time-to-Market	Kosten
Köhler 2009	Produkt	Prozesse	Ressourcen	-	Zeit	Kosten
Jarratt et al. 2011	im und andere Produkt(e)	Produktion	Mitarbeiter	-	Zeitplan	Kosten

Legende: - nicht adressiert

Auswirkungen in und auf Produkte: Technische Änderungen implizieren stets Modifikationen an technischen Produkten und zugehörigen Komponenten. Jedes Produkt weist inhärent eine Architektur auf (Martin & Ishii 2002, S. 214), über die es charakterisiert werden kann (Maurer 2007, S. 30–32) und die die Änderungsausbreitung innerhalb eines Produkts maßgeblich beeinflusst. Die wichtigsten Aspekte der Produktarchitektur sind laut Ulrich (1995, S. 420) die Anordnung von funktionalen Elementen, deren Zuordnung zu physischen Komponenten sowie die Spezifikation der Schnittstelle zwischen diesen Komponenten. Die Produktstruktur⁵, die neben der Funktionsstruktur als Teil der Produktarchitektur verstanden wird (vgl. Abbildung 2-1), beschreibt die physische Dekomposition eines Produkts, bspw. in Subsysteme, Baugruppen und Komponenten (Feldhusen et al. 2012a, S. 255–258; Franke & Schrader 1998).

Zwischen Elementen eines Systems bestehen zudem Schnittstellen über die Energie, Informationen oder Materie übertragen werden. Über diese physischen Schnittstellen hinaus existieren abstrakte Beziehungen, die sich aus der physischen Präsenz von Komponenten oder der gestalterisch-ästhetischen Beziehung ergeben (Feldhusen et al. 2012a).

⁵ In den Ingenieurwissenschaften wird anstelle von Produktstruktur auch häufig der Begriff Baustuktur verwendet, vgl. Pahl & Beitz (1993, S. 474).

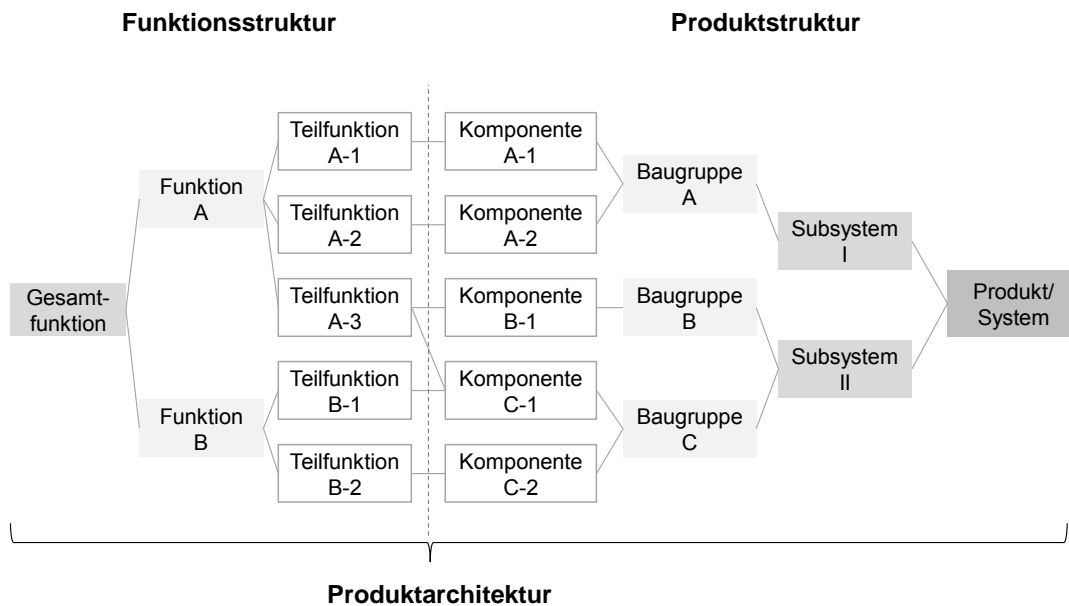


Abbildung 2-1: Darstellung der Produktarchitektur bestehend aus Funktions- und Produktstruktur in Anlehnung an Franke & Schrader (1998, S. 97)

Die Zusammenhänge innerhalb der Produktstruktur können bei Änderung einer Komponente zu Änderungen an weiteren Komponenten führen (Eckert et al. 2004, S. 10; Fricke et al. 2000, S. 172; Jarratt & Clarkson 2005, S. 275). Diese Kettenreaktion, die häufig schwer vorherzusehen ist, kann letztendlich einen größeren Änderungsumfang als gewünscht verursachen (Hamraz 2013). Der Effekt ist in der angelsächsischen Literatur als „Change Propagation“ bekannt (Eckert et al. 2004, S. 10; Hamraz 2013, S. 5), im Deutschen werden dafür die Begriffe „Änderungsfortpflanzung“, „Änderungspropagation“ oder „Änderungsausbreitung“ verwendet (Köhler 2009, S. 69). In dieser Arbeit soll der zuletzt genannte Begriff verwendet werden.

Die strukturelle Komplexität eines Produkts, die durch die Konnektivität⁶ und Varietät⁷ von Relationen bzw. Elementen im System beschrieben wird (Patzak 1982, S. 22), hat einen Einfluss auf das Verhalten hinsichtlich einer Änderungsausbreitung. Je komplexer ein Produkt ist, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Änderung einer Komponente zu Änderungen an weiteren Komponenten führt (Eckert et al. 2004, S. 1). Werden die zu ändernden Komponenten eines Produkts in Produktvarianten oder in anderen Produkten eingesetzt, können sich Änderungen auch über Produkte hinweg ausbreiten (Köhler 2009, S. 17).

Auswirkungen auf Prozesse: Von technischen Änderungen können nahezu alle Bereiche eines Unternehmens mit ihren Prozessen und Ressourcen betroffen sein, von der Produktentwicklung und Produktion über die Materialwirtschaft bis zum Vertrieb und Service (Gemmerich 1995, S. 98). Die Auswirkungen sind nicht nur auf das Unternehmen begrenzt, sondern können darüber hinaus Kunden und Zulieferer betreffen (Conrat Niemerg 1997, S. 152). Wynn et al.

⁶ Die Konnektivität wird durch Art und Anzahl der Beziehungen im System beschrieben.

⁷ Die Varietät wird über die Art und Anzahl der Elemente im System bestimmt.

(2014) machen hierfür Abhängigkeiten zwischen Informationsflüssen im Produktlebenszyklus verantwortlich, welche zur Wiederholung oder Nacharbeit bereits getätigter Prozessaktivitäten führen. Dabei müssen ggf. auch bereits geplante, zukünftige Aktivitäten im Entwicklungsprozess überarbeitet werden. Insbesondere beim Simultaneous Engineering entstehen viele Abhängigkeiten, durch parallele Entwicklungsaktivitäten, die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Produkt-, Produktions- und Vertriebsentwicklung sowie die Betrachtung des gesamten Produktlebenslaufs, die bei Änderungen berücksichtigt werden müssen (Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 227–229).

Auswirkungen auf Humanressourcen: Technische Änderungen können Auswirkungen auf die Arbeitersituation, insbesondere in Entwicklungsabteilungen, haben (Conrat Niernerg 1997, S. 90; Riedel 1998, S. 213). Sie können sich negativ auf die Motivation der Mitarbeiter auswirken und ein „Gefühl der Entwertung der Erstkonstruktion“ entstehen lassen (Riedel 1998, S. 213). Lernschleifen aufgrund von Änderungen werden allerdings auch positiv für den Mitarbeiter bewertet (Riedel 1998, S. 213). Technische Änderungen führen häufig zu einer erhöhten Arbeitsbelastung der beteiligten Mitarbeiter und beeinflussen deren Arbeitseffizienz im Entwicklungsprozess häufig negativ (Conrat Niernerg 1997, S. 90; Huang et al. 2003, S. 483).

Auswirkungen auf die Qualität: Änderung wirken sich in der Regel positiv auf die Produktqualität aus, bspw. durch inkrementelle Produktverbesserungen (Wright 1997, S. 41) oder indem Kundenanforderungen besser erfüllt oder aufgetretene Fehler behoben werden (Eckert et al. 2004, S. 14). Allerdings können auch negative Auswirkungen auf die Produktqualität entstehen, bspw. wenn Folgeänderungen nicht vollständig umgesetzt werden (Hamraz 2013, S. 29). Im schlimmsten Fall führt dies zu Fehlern, die erst bei der Nutzung des Produkts auftreten (Hamraz 2013, S. 29).

Auswirkungen auf die Änderungs- und Entwicklungsdauer: In mehrfacher Hinsicht können Änderungen zu Zeitverzögerungen führen: einerseits durch die mögliche Verzögerung während der Prüfung eines vorliegenden Änderungsantrags, andererseits durch die notwendige Wiederholung von Entwicklungsaktivitäten (Conrat Niernerg 1997, S. 87) sowie durch eine Störung von Standardabläufen, die Terminverschiebungen zur Folge haben (Dale 1982; Gemmerich 1995, S. 97). Diese Verzögerungen nehmen Einfluss auf die wettbewerbsrelevante Größe „Time-to-Market“, die die Zeitspanne von der Entwicklung bis zur Markteinführung umfasst (Gille 2013, S. 69). Diese sollte aus folgenden Gründen möglichst kurz sein (Gille 2013, S. 69–70):

- Während der Entwicklung von Produkten entstehen zwar Kosten, jedoch keine Umsätze und damit keine Einnahmen (Wildemann 1998, S. 389).
- Ein schneller Markteintritt ermöglicht es, als Quasi-Monopolist die zunächst hohe Zahlungsbereitschaft der Kunden für das neue Produkt auszuschöpfen (Gille 2013, S. 70; Lint & Pennings 1999, S. 483).

Technische Änderungen können sich auch positiv auf die „Time-to-Market“ auswirken, indem Änderungen an einem Produkt eigenständige Neuentwicklungen mit hohem Zeitbedarf (und hohen Kosten) vermeiden (Gille 2013, S. 70). Außerdem kann der Produktlebenszyklus eines Produkts durch Änderungen verlängert werden (Gille 2013, S. 70–71).

Auswirkungen auf Kosten: Technische Änderungen können sich sowohl negativ als auch positiv auf die Kosten(-situation) des Unternehmens auswirken. Eine ausführliche Auseinandersetzung mit den Auswirkungen auf Kosten und Kosteneffekte findet sich in Conrat Niemerg (1997). Eine positive Auswirkung auf die Kostensituation entsteht, wenn Änderungen Neuentwicklungen mit hohen Kosten vermeiden (Gille 2013, S. 70). Technische Änderungen stellen jedoch auch einen bedeutenden Treiber der Kosten im Unternehmen dar (Deubzer et al. 2005, S. 2), die insbesondere durch die Komplexität des Produkts (Köhler 2009, S. 22) und den Zeitpunkt der technischen Änderung (Gille 2013, S. 74) bestimmt werden. Führen lange Durchlaufzeiten der Änderungen zur Überschreitung kritischer Projekttermine können diese sogar mit Konventionalstrafen verbunden sein (Conrat Niemerg 1997, S. 158). Technische Änderungen, die erst in der Serienproduktion durchgeführt werden, verursachen gemäß der „Rule-of-ten“ die höchsten Kosten (Gemmerich 1995, S. 112).

Änderungsauswirkungen von technischen Änderungen betreffen insbesondere das Produkt oder Produktportfolio, Prozesse und Ressourcen eines Unternehmens (oder verbundenen Unternehmen) und lassen sich in Kosten, Zeit und Qualität ausdrücken.

Änderungsausbreitung wird der Effekt genannt, wenn die intendierte Änderung einer Komponente, weitere Änderungen an Komponenten oder Prozessen nach sich zieht, die durch Abhängigkeiten in der Produkt- oder Prozessstruktur bedingt sind.

2.1.2 Technisches Änderungsmanagement

Im Verlauf der letzten 20 Jahren hat sich das Änderungswesen zum Änderungsmanagement weiterentwickelt und an Aufgabenbereichen und Verantwortung hinzugewonnen. Der Wandel ging mit dem Paradigmenwechsel in der Produktentwicklung einher, welcher das Simultaneous Engineering, Concurrent Engineering oder die Integrierte Produktentwicklung hervorbrachte. Hierfür werden folgende Rahmenbedingungen verantwortlich gemacht (Aßmann & Conrat Niemerg 1998, S. 51):

- Kürzer werdende Lebenszyklen der Produkte
- Höhere Anforderungen an die Produkte
- Kürzere Entwicklungszeiten
- Steigende Entwicklungskosten aufgrund komplexer Produkte
- Globalisierung der Entwicklung

Das stark administrative und reaktive Änderungswesen war damit nicht mehr vereinbar. Das Änderungswesen wurde ursprünglich von Pflicht (1989, S. 9) als „*die Summe aller ablauforganisatorischen Maßnahmen und die dazugehörigen Organisationsmittel zur Änderung von materiellen Gegenständen sowie deren Dokumentationen*“ definiert. Hierbei stand nicht die ganzheitliche Betrachtung von technischen Änderungen im Vordergrund, sondern lediglich die Abwicklung und Verarbeitung im Sinne der Datenverarbeitung (Jania 2004, S. 31).

Das Konfigurationsmanagement⁸ gilt neben dem Änderungswesen als Teil des Änderungsmanagements (Kleedörfer 1998, S. 45) und hat zum Ziel, die Konsistenz in der Dokumentation während der Produktentwicklung aufrecht zu erhalten (Burghardt 2013; Kleedörfer 1998; Saynisch 1984). Während der Entwicklung existiert das Produkt als Dokument, Einzelteil, Baugruppe und als Ganzes in unterschiedlichen Versionen (Burghardt 2013, S. 317; Kleedörfer 1998, S. 46). Technische Änderungen werden nach diesem Verständnis erforderlich, wenn eine Differenz zwischen zwei Konfigurationen⁹ vorliegt (Saynisch 1984, S. 47).

Aus dem reaktiven Änderungswesen entwickelte sich das Änderungsmanagement, das eine proaktive Herangehensweise forciert und auch die innovative und positive Wirkung von Änderungen als wesentlichen Bestandteil des Entwicklungsprozesses sieht. Dabei schließt das integrierte Änderungsmanagement neben technischen Aspekten teamorientierte Prozesse und organisatorische Maßnahmen ein, um die Effizienz und Effektivität von Änderungen im Unternehmen zu verbessern (Lindemann & Reichwald 1998). Das integrierte Änderungsmanagement umfasst hierbei die in Abbildung 2-2 dargestellten Aktionsfelder, die nicht losgelöst voneinander betrachtet werden können.

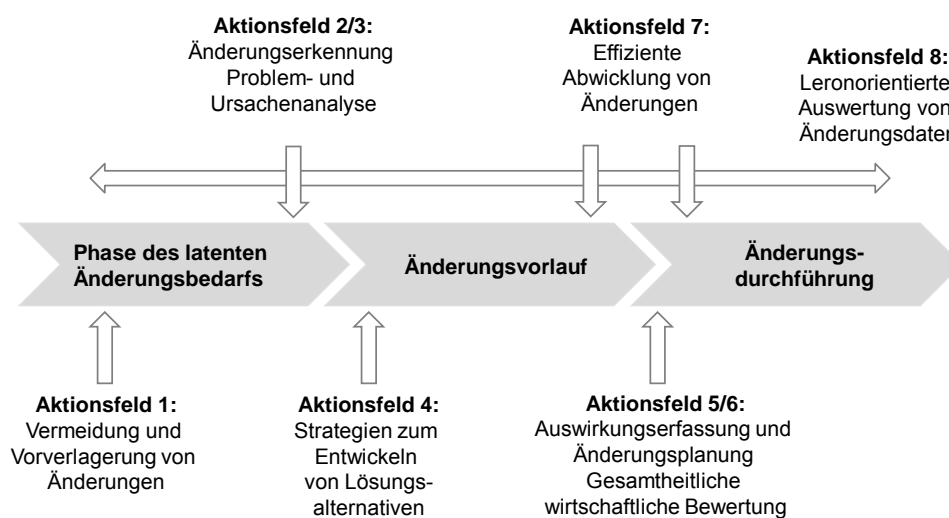


Abbildung 2-2: Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements nach Aßmann & Conrat Niernerg (1998)

Das Änderungsmanagement wird von Lindemann & Reichwald (1998, S. 327) definiert als „Gesamtheit aller Maßnahmen zur Vermeidung sowie zur gezielten Vorverlagerung und effizienten Planung, Auswahl, Bearbeitung und Regelung von Produktänderungen.“

⁸ Nach Saynisch (1984) und Burghardt (2013) umfasst das Konfigurationsmanagement das Änderungswesen.

⁹ Eine Konfiguration umfasst die „vollständige, in Dokumenten niedergelegte Beschreibung eines Systems / Produkts, die benötigt wird, um das System / Produkt über seine gesamte Lebensdauer zu fertigen, zu testen, zu betreiben und zu warten“ (vgl. Saynisch 1984, S. 4).

Diese Ausrichtung des Änderungsmanagements spiegelt sich auch in der englischsprachigen Literatur wieder. Das Änderungsmanagement umfasst demnach das Planen, Steuern und Kontrollieren von technischen Änderungen über den gesamten Produktlebenszyklus von der Konzeptauswahl bis zur Produktion und dem Service (Jarratt et al. 2011, S. 105). Hierbei werden die Ziele der Vermeidung und Reduktion von Änderungen, die frühe Identifikation, der effektive Umgang und die effiziente Implementierung von Änderungen verfolgt (Fricke et al. 2000).

Entsprechend wird im Rahmen dieser Arbeit das Änderungsmanagement wie folgt definiert:

*Das **technische Änderungsmanagement** umfasst Strategien und Maßnahmen zum Umgang mit technischen Änderungen die auf eine Vermeidung, Vorverlagerung, eine effektive und effiziente Abwicklung sowie das Lernen aus vergangenen Änderungen abzielen.*

Im folgenden Abschnitt werden die Strategien im Änderungsmanagement diskutiert, die den Kern der Definition des technischen Änderungsmanagements bilden.

2.1.3 Strategien im technischen Änderungsmanagement

Zum Umgang mit Änderungen werden verschiedene Strategien vorgeschlagen, die letztendlich darauf abzielen „[...] weniger Änderungen zu haben, diese früher zu erkennen, daraus effektiver auszuwählen, dann effizienter die Änderungen durchzuführen und letztendlich es beim nächsten Mal besser zu machen.“ (Fricke 1998, S. 128). Die von Aßmann & Conrat Niemerg (1998, S. 51–57) dargestellten Aktionsfelder des integrierten Änderungsmanagements (vgl. Abbildung 2-2) lassen sich in den fünf verbreiteten Strategien wiederfinden (vgl. Hamraz 2013, S. 7–9, Fricke et al. 2000): Vermeidung, Vorverlagerung, Effektivität, Effizienz und Lernen.

Vermeidung

Die Strategie Vermeidung hat zum Ziel unnötige Änderungen zu vermeiden, so dass die Gesamtanzahl an Änderungen in einem Unternehmen reduziert wird. Laut einer am Lehrstuhl für Produktentwicklung durchgeführten Studie sind ungefähr 39 % der fehlerbedingten technischen Änderungen vermeidbar und damit 22 % aller technischen Änderungen (Conrat Niemerg 1997, S. 131; Deubzer et al. 2005, S. 8).

Unnötige Änderungen sind insbesondere Änderungen, die durch Fehler verursacht werden (Aßmann et al. 1998, S. 267), die ungeplant sind (Jarratt et al. 2011, S. 121) oder in späten Projektphasen auftreten. Vermeidbar sind außerdem technische Änderungen, die aufgrund mangelnder Kommunikation, falscher Interpretation, fehlender oder verspäteter Informationen und terminologische Fehler entstehen (Wasmer et al. 2011, S. 534). Da fehlerbedingte Änderungen nicht immer vermieden werden können, wird empfohlen, zumindest die Wiederholung von Fehlern zu vermeiden (Aßmann 1998).

Die Möglichkeiten Änderungen zu vermeiden sind ebenso vielfältig wie die zu vermeidenden Änderungen selbst. Nach Aßmann (1998) basieren vermeidbare Änderungen häufig auf Fehlern

im Entwicklungsprozess. Daher eignen sich Qualitätsmanagement-Methoden wie beispielsweise Produkt- und Prozess-FMEA¹⁰ oder QFD¹¹, ein systematisches Vorgehen im Produktentwicklungsprozess (vgl. Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel & Meerkamm 2013) unter Anwendung der Konstruktionsmethodik und eine Verbesserung des Informationsflusses. Um Fehler nicht zu wiederholen, können Wissensmanagement-Ansätze unterstützend herangezogen werden (Aßmann 1998, S. 107–122). Auch eine Schärfung des Bewusstseins der Mitarbeiter für Änderungen kann das Wiederholen von Fehlern vermeiden (Fricke et al. 2000, S. 173).

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit durch „Design for flexibility“ oder „Design for robustness“¹² gezielt Flexibilität im Produkt vorzuhalten bzw. das Produkt gegenüber äußeren Veränderungen unempfindlich zu gestalten. So kann durch das Produktkonzept der Strategie Vermeidung Rechnung getragen werden (Fricke & Schulz 2005).

Eine späte Festlegung des Konzepts („design freeze“) führt zwar zu weniger offiziellen Änderungsaktivitäten, allerdings finden diese im Normalfall trotzdem statt, werden aber nicht als solche deklariert (Fricke 1998, S. 133). Die frühe Festlegung von Anforderungen („freezing of specification“) wird ebenfalls als eine Möglichkeit zur Vermeidung von Änderungen gesehen, aber gleichzeitig auch als unrealistisch eingestuft (Fricke et al. 2000, S. 173). Initiale Anforderungen sind selten korrekt und eine frühe Festlegung dieser führt mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zu nicht marktgerechten Produkten (Smith & Reinertsen 1991, S. 94–97).

Alle Änderungen zu vermeiden ist sowohl unrealistisch als auch nicht wünschenswert (Clark & Fujimoto 1991, S. 121). Erfahrungsgemäß führen Fragen nach den grundlegenden Ursachen von Änderungen zu den wichtigsten Handlungsfeldern der Vermeidung (Conrat Niernerg & Voigt 1998, S. 29). Eine Analyse vergangener Änderungen in ähnlichen Projekten, wie sie diese Arbeit zum Ziel hat, kann dabei helfen zu verdeutlichen, „was“ am häufigsten geändert wurde, „warum“ und zu welchen Kosten. Damit können für Änderungen, die vergleichsweise oft aus dem gleichen Grund stattfinden und einen hohen Aufwand im Unternehmen erzeugen, gezielt Gegenmaßnahmen eingeführt werden (Fricke 1998, S. 131).

Vorverlagerung

Die Strategie Vorverlagerung setzt auf eine frühe Erkennung und Umsetzung von Änderungen, um einen geringeren Änderungsaufwand im Unternehmen zu generieren. Diese Strategie beruht auf der Grundlage der „Rule-of-ten“ (Clark & Fujimoto 1991), nach welcher der Aufwand für eine Änderung mit jeder Phase, in der die Änderung im Produktentstehungsprozess nicht umgesetzt wird, um den Faktor zehn steigt. Idealerweise werden Änderungen daher noch in der Phase gefunden und beseitigt in der sie auftreten (Aßmann 2000, S. 76).

Technische Änderungen können vorverlagert werden, indem Konzepte früh hinsichtlich ihrer Eigenschaftserfüllung abgesichert werden.

¹⁰ FMEA steht für Failure Mode and Effects Analysis und ist eine Methode zur Fehlervermeidung.

¹¹ QFD steht für Quality Function Deployment und ist eine Methode zur Qualitätsentwicklung.

¹² Für weitere Informationen zu „Design for flexibility“ und „Design for robustness“ sei auf Ross et al. (2008), Fricke & Schulz (2005), Keese et al. (2006) und Bischof & Blessing (2008) verwiesen.

Hierzu eignen sich Vorgehensweisen des Simultaneous Engineering, wie beispielsweise die frühe Lieferanten- und Kundenintegration kombiniert mit diversen Methoden des Qualitätsmanagements, der Eigenschaftsabsicherung (z. B. FMEA, FEM) sowie der Einsatz von SE-Teams¹³ (Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 228–229). Eine Bewertung der Qualität von Absicherungsmethoden im industriellen Kontext kann über die Bewertung der entdeckten Abweichungen erfolgen (Hesse et al. 2011). Neben Absicherungsmethoden unterstützen auch „Design for X“ Ansätze frühe Änderungen im Entwicklungsprozess, bspw. „Design for Manufacture and Assembly“ (Jarratt & Clarkson 2005, S. 280).

Im Hinblick auf eine ganzheitliche Effizienzbetrachtung ist es jedoch nicht sinnvoll, alle Änderungen so früh wie möglich zu identifizieren und umzusetzen (vgl. Jarratt & Clarkson 2005, S. 280–281). Die frühe Phase der Produktentwicklung ist charakterisiert durch ein chronisches Informationsdefizit und einen hohen Grad an Unsicherheit (Ullman 2003, S. 18), so dass nur bedingt Aussagen über Produkteigenschaften abgeleitet werden können. Wird eine Vorverlagerung zu dogmatisch verfolgt, können sogar Wettbewerbsnachteile entstehen, indem nicht mehr auf Kundenwünsche reagiert wird (Fricke et al. 2000, S. 177). Daher erscheint es sinnvoll systematisch abzuleiten, wann im Entwicklungsprozess Aktivitäten zur Änderungserkennung durchgeführten werden sollten (Wickel et al. 2013a).

Weiterhin kann die Strategie der Vorverlagerung durch die Nutzung von Erfahrungswissen aus bereits abgewickelten Projekten unterstützt werden. Der dazu benötigte Wissenstransfer kann sowohl über Personen als auch computerbasiert erfolgen (Aßmann 1998, S. 120). Dabei kann insbesondere Wissen über Auftretenswahrscheinlichkeiten von Änderungen und die Höhe von Änderungsauswirkungen bereitgestellt werden (Fricke et al. 2000).

Effektivität

Diese Strategie basiert auf einer Bewertung von Änderungen hinsichtlich ihrer Notwendigkeit und Nützlichkeit mit dem Ziel, unwirtschaftliche Änderungen früh abzulehnen (Gemmerich 1995). Laut einer Studie ist ein Anteil von 23 % aller Änderungen optional und nicht für die Erfüllung von Anforderungen notwendig (Deubzer et al. 2006, S. 817). Diese sogenannten Kann-Änderungen sollten spezifisch geprüft werden, um nur die Änderungen mit positivem Nutzen-Aufwand-Verhältnis umzusetzen (Aßmann 1998, S. 122). Die Strategie betrifft auch Muss-Änderungen insofern zwischen verschiedenen Lösungsalternativen für eine technische Änderung entschieden wird.

Grundsätzlich ist für eine gute Änderungsentscheidung eine fundierte Informationsgrundlage erforderlich, die durch rechtzeitige Einbindung der richtigen Personen erzielt werden kann. Eine weitere Studie zeigt, dass erfolgreiche Unternehmen vergleichsweise mehr Unternehmensbereiche einbeziehen, wodurch ein besseres Verständnis über die Auswirkungen von Änderungen erzielt wird (Brown & Boucher 2007, S. 9). Die Änderungsbewertung erfolgt häufig erfahrungsbasiert (Fricke et al. 2000, S. 174) unterstützt durch Methoden zur Auswirkungsanalyse und -bewertung (vgl. Kapitel 2.4).

¹³ Das Simultaneous Engineering-Team ist ein interdisziplinäres Team, das für die Entwicklungs- und Erstellungs-dauer eines innovativen Produkts gebildet wird. Es trägt die Produktverantwortung bis zur Serienfertigung oder ersten Verkaufserfolgen (Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 229).

Effizienz

Diese Strategie zielt auf eine aufwandsarme und schnelle Implementierung von Änderungen in Unternehmen ab, um vorhandene Ressourcen bestmöglich einzusetzen (Fricke et al. 2000). Im Fokus dieser Strategie stehen Änderungen, die als nützlich für das Unternehmen eingestuft wurden (vgl. Effektivität).

Für die Abwicklung von Änderungen werden in Unternehmen normalerweise standardisierte Änderungsprozesse eingesetzt (vgl. Kapitel 2.2.1), die gesetzgeberische und normative Anforderungen erfüllen müssen. Durch die Einführung eines Qualitätsmanagementsystems (vgl. DIN EN ISO 9001:2015) wird bspw. die ständige Verbesserung der Unternehmensprozesse zur Steigerung der Kundenzufriedenheit gefordert, wodurch einige Implikationen für den Änderungsprozess entstehen. Köhler (2009, S. 52) beschreibt insgesamt sieben Anforderungen, darunter die „*Bestimmung der Auswirkungen technischer Produktänderungen auf alle Strukturstufen des betrachteten Produktes, andere Produkte und bereits gelieferte Erzeugnisse*“. Da technische Änderungen sehr unterschiedlich sein können, sollte der Änderungsprozess im Sinne der Effizienz innerhalb definierter Grenzen für die spezifische Änderung anpassbar sein (Fricke et al. 2000, S. 175). Voigt & Riedel (1998, S. 233) empfehlen diesen durch Änderungsklassen und Prioritäten situativ anzupassen, um sogenannte „Bypass“-Lösungen zu vermeiden.

Zur Bewertung der Effizienz eignen sich geplante und tatsächliche Durchlaufzeiten von Änderungen, Leerzeiten sowie eingebrachte Personen-Stunden von Mitarbeitern (Huang et al. 2003, S. 483; Riviere et al. 2013, S. 8–9). Laut einer Studie von Brown & Boucher (2007, S. 9) haben durchschnittliche Unternehmen einen Nachholbedarf bezüglich der Steigerung der Effizienz von Änderungsprozessen.

Lernen

Mit der Strategie des Lernens wird eine Verbesserung der zuvor genannten Strategien angestrebt. Technische Änderungen werden hierbei als Chance angesehen das Produkt zu verbessern, mit ähnlichen Änderungen zukünftig besser umzugehen oder diese sogar komplett zu vermeiden (Fricke et al. 2000).

Durch Reviews vergangener Änderungen können Erkenntnisse über typische und sich wiederholende Fehler an Produkten sowie in Entwicklungs- und Änderungsprozessen identifiziert werden (Voigt & Conrat Niernerg 1998). Diese Erkenntnisse sollten zurück in die Produktentwicklung transferiert werden, um Verbesserungsmaßnahmen für die zuvor genannten Strategien anzustoßen (Fricke et al. 2000). Ebenso können Analysen von Änderungsdaten sowie dokumentiertes Erfahrungswissen, bspw. in Form von Lessons Learned, bei der Bewertung, Entscheidung und Planung von Änderungen unterstützen. Damit werden Bewertungs- und Planungsprozesse beschleunigt und deren Qualität erhöht (Voigt & Conrat Niernerg 1998).

Einige Änderungsprozesse (vgl. Kapitel 2.2.1) besitzen eine explizite Review-Phase innerhalb der überprüft wird, inwiefern das mit einer Änderung verfolgte Ziel erreicht wurde und welche Erkenntnisse aus dem Änderungsprozess für zukünftige Prozesse festgehalten werden sollten (Jarratt et al. 2011).

2.2 Umsetzung technischer Änderungen in Unternehmen

Zur Umsetzung von technischen Änderungen in Unternehmen werden Änderungsprozesse verwendet, die auf einem Makrolevel stets gleiche Basisaktivitäten erfordern, sobald eine Änderung ausgelöst wird (Jarratt & Clarkson 2005, S. 269). Zur Umsetzung dieser Prozesse werden in Unternehmen in der Regel informationstechnische Hilfsmittel eingesetzt (Brown & Boucher 2007).

2.2.1 Änderungsprozesse

Die Änderungsprozesse haben sich mit den Strategien im Änderungsmanagement (vgl. Kapitel 2.1.3) weiterentwickelt. Im Folgenden wird die Entwicklung der Änderungsprozesse aufgezeigt, wobei auf den VDA Referenzprozess (VDA 4965:2010) aufgrund seiner Detailliertheit und weiten Verbreitung in der Praxis näher eingegangen wird.

Zunächst bestanden Änderungsprozesse lediglich aus den Phasen Änderungsvorbereitung und -durchführung (vgl. DIN 199-4:1981). Die erste Phase diente der Informationsbeschaffung zur Vorbereitung auf die folgende Entscheidung über die technische Änderung. Im Falle einer Ablehnung wird der Änderungsprozess nicht weitergeführt. Die zweite Phase umfasst die Implementierung der technischen Änderung in Folge einer Genehmigung, in der der Änderungsantrag zum Änderungsauftrag wird (DIN 199-4:1981; Dale 1982). In weiteren Ansätzen werden diese Phasen und zugehörige Aktivitäten detailliert und teilweise neu strukturiert (Hiller 1997; Kleedörfer 1998; Maull et al. 1992; Riviere et al. 2013).

Unternehmen des deutschen Automobilbaus, Forschungsinstitute und Softwareunternehmen entwickelten gemeinsam eine Empfehlung für einen detaillierten Änderungsmanagement-Referenzprozess (VDA 4965-0:2010). Mit diesem sollen insbesondere Änderungen zwischen Projektpartnern effizient abgewickelt werden. Abbildung 2-3 zeigt den entwickelten Änderungsmanagement-Referenzprozess mit den beiden Subprozessen des Änderungsantrags (Engineering Change Request, ECR) und des Änderungsauftrags (Engineering Change Order, ECO).

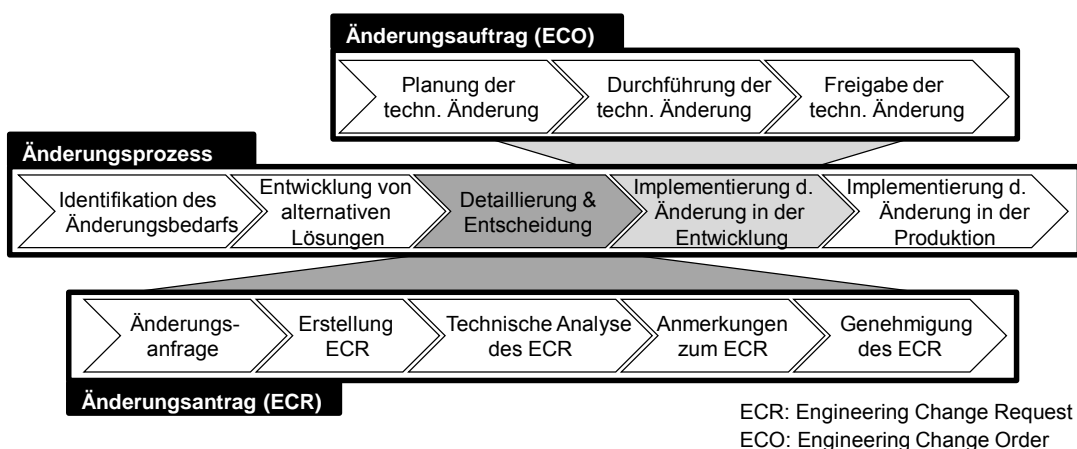


Abbildung 2-3: Änderungsmanagement-Referenzprozess nach VDA 4965-0:2010

Der **Änderungsprozess** beginnt mit der Identifikation eines Änderungsbedarfs und einer ersten wirtschaftlichen und technischen Bewertung. Wird die Änderung als sinnvoll bewertet, startet die Phase „Entwicklung von alternativen Lösungen“. In dieser Phase werden unterschiedliche Lösungsalternativen gegeneinander abgewogen und letztendlich eine ausgewählt, die in der nachfolgenden Phase bezüglich Wirtschaftlichkeit und technischer Machbarkeit bewertet wird. Hierzu wird gemäß des Subprozesses ein **Änderungsantrag** mit eindeutiger Änderungsnummer erstellt, der Änderungskoordinator ergänzt diesen um weitere Informationen, bspw. eine Problembeschreibung und den Änderungsumfang, der wiederum die betroffenen Bauteile enthält. Im Anschluss bewerten die jeweiligen bauteilverantwortlichen Entwickler die Machbarkeit, Umsetzung und Folgen der Änderung. Anschließend schätzen weitere Beteiligte, die der Änderungskoordinator über eine sogenannte Verteilerliste bestimmt, die Auswirkungen der Änderungen in den Unternehmensbereichen wie zum Beispiel Versuch, Produktionsplanung und Vertrieb. Der Änderungskoordinator aggregiert die Informationen, so dass über die Umsetzung der Lösungsalternative entschieden werden kann.

Nach einer positiven Entscheidung wird in der Phase „Implementierung der Änderung in der Entwicklung“ der Änderungsantrag in einen **Änderungsauftrag** überführt und spezifiziert. Im Schritt der Änderungsdurchführung werden CAD-Modelle, 2-D-Zeichnungen, Stücklisten und weitere Dokumente modifiziert sowie im letzten Schritt formal auf Vollständigkeit geprüft und freigegeben.

Im Anschluss beginnt die Phase „Implementierung der Änderung in der Produktion“, mit welcher die Änderung in der Fertigung implementiert wird. Hierbei können Anpassungen an Produktionsprozessen, -maschinen und der Logistikkette vorgenommen sowie neue und geänderte Teile durch Qualitätsmaßnahmen abgesichert werden. Mit der Implementierung der Änderung in der Produktion ist die Änderung abgeschlossen.

Diesem praxisnahen Prozess gegenüber stehen Änderungsprozesse aus der Forschung, die zusätzliche frühe und späte Phasen aufweisen. Der Änderungsprozesses nach Lindemann & Reichwald (1998) besitzt eine „Phase des latenten Änderungsbedarfs“, die zeitlich noch vor der Identifikation des Änderungsbedarfs liegt. In dieser Phase liegt bereits eine Soll/Ist-Abweichung vor, der Bedarf für eine Änderung ist allerdings noch nicht entdeckt worden. Mit dieser Phase erlangt der Änderungsprozess eine neue Ausrichtung, die nicht mehr nur die Abwicklung von Änderungen adressiert, sondern auch das Potenzial der Vorverlagerung und frühen Änderungserkennung (vgl. Kapitel 2.1.3) in den Prozess integriert (Aßmann 2000; Lindemann & Reichwald 1998).

Des Weiteren wird eine Review-Phase vorgeschlagen, die nach der Implementierung der Änderung stattfindet (Jarratt et al. 2004; Lee et al. 2006). In dieser Phase wird retrospektiv analysiert, inwiefern die technische Änderung die beabsichtigte Wirkung erzielte und welche Erkenntnisse für zukünftige technische Änderungen gewonnen werden konnten (Jarratt et al. 2004, S. 2). Weiterhin empfehlen Lee et al. (2006) die Daten einer technischen Änderung nach der Implementierung zu prüfen, aufzubereiten und zu speichern, so dass diese in zukünftigen Änderungsprozessen wiedergefunden und wiederverwendet werden können. Die Review-Phase eines Änderungsprozesses unterstützt die Strategie des Lernens im Änderungsmanagement (vgl. Fricke et al. 2000) und die lernorientierte Auswertung von Änderungsdaten (vgl. Reichwald & Conrat Niemerg 1996).

In einem Vergleich von sieben unternehmensspezifischen Änderungsprozessen aus unterschiedlichen Industriebereichen (bspw. Hausgeräte- und Automobilbranche), zeigen Wickel et al. (2014a) prozessuale Unterschiede im industriellen Umfeld auf. Hierbei zeigte sich, dass Änderungsprozesse sich insbesondere in den frühen und späten Phasen unterscheiden. Die Phase des „latenten Änderungsbedarfs“ wird von keinem Unternehmen berücksichtigt, wohingegen die Review Phase zumindest bei zwei von sieben Unternehmen durchgeführt wird. Sie dient der Überprüfung, ob der Änderungsbedarf behoben werden konnte, die geschätzten Auswirkungen eingetreten sind und die zugrundeliegenden Annahmen (bspw. Absatzvolumen des Produkts) zutreffend waren. Nur zwei der Unternehmen gaben an, bei kritischen Änderungen Lessons Learned durchzuführen (Wickel et al. 2014a).

2.2.2 Informationstechnische Unterstützung von Änderungsprozessen

Die Anzahl an Änderungen in komplexen Produktentwicklungen ist enorm (Sharafi 2013, S. 48) und gleichzeitig steigen die gesetzlichen Anforderungen an die Produkt- und Änderungsdocumentation (Feldhusen et al. 2012b, S. 102). Änderungen erzeugen dadurch einen hohen Koordinationsaufwand, der durch Instrumente des Projektmanagements und Simultaneous Engineering nicht ausreichend abgedeckt wird. Die Nutzung von Informations- und Datenmanagement-Systemen (Belener 2008, S. 32) und flexibler Werkzeuge zur digitalen Änderungsbearbeitung (Feldhusen et al. 2012b) bietet hierbei Unterstützung.

Das **Product-Lifecycle-Management (PLM)** ist ein strategisches Konzept zur Vereinigung aller an einem Produktlebenslauf involvierten Informations-, Kommunikations- und Datenmanagement-Systeme (Eigner & Stelzer 2009, S. 269–271) mit dem Ziel, Produkt- und Prozessdaten über den gesamten Produktlebenslauf konsistent zu verwalten und bedarfsgerecht zu steuern (Schuh 2014). Für das Änderungsmanagement sind hiervon Workflow-Systeme, Produktdaten-Managementsysteme (PDM-Systeme) und Enterprise-Ressource-Planning-Systeme (ERP-Systeme) relevant (Köhler 2009, S. 64). Diese unterstützen die Steuerung der Informations- und Aufgabenflüsse sowie die Verwaltung von Daten in der Produktentwicklung bzw. Produktion (Eigner & Stelzer 2009, S. 276; Gausemeier 2001, S. 525). Workflow- und PDM-Systeme werden meist in Verbindung miteinander in einer integrierten Softwarelösung¹⁴ eingesetzt (Lauer 2010, S. 31; Riedel & Voigt 1998, S. 72).

Die Umsetzung des Änderungsprozesses wird insbesondere über **Workflow-Systeme** realisiert, in denen Mitarbeiter innerhalb organisatorischer Abläufe bei der Koordination und Kommunikation ihrer Aufgaben (Spur & Krause 1997), der Dokumentation aller Prozessschritte einer Änderung (Feldhusen et al. 2012b, S. 102) und der Nachverfolgung von technischen Änderungen bezüglich ihres Abarbeitungsgrades (Feldhusen et al. 2012b, S. 123) unterstützt werden. Einem Workflow-System liegen in der Regel ein detaillierter Referenzprozess mit strukturierten Aktivitäten, Meilensteinen und Gates, sowie eine Beschreibung der Rollen, die diese Aktivitäten ausführen, zugrunde. Ein weiterer Aspekt sind die Informationsflüsse zwischen all diesen zuvor genannten. Die Ausführung einzelner Prozessschritte wird im Workflow-System

¹⁴ Vgl. CIM Database ECM (www.contact-software.com), ⁴PEP Änderungsmanagement (www.ilc-solutions.de) oder Aras® Product Engineering (www.aras.com).

durch vordefinierte Aktivitäten und Deadlines angestoßen (Weber 2005b, S. 8). Es kann daher als aktives System verstanden werden, das Nutzer bei der tatsächlichen Ausführung der Prozesse unterstützt (Eder & Groiss 1996). Workflow-Systeme weisen zudem häufig Integrationsmöglichkeiten auf, die es ermöglichen, nutzerrelevante Informationen bereitzustellen. Dadurch kann eine aufwendige Suche sowie das Wechseln zwischen verschiedenen Systemen vermieden werden (Nedeß et al. 2006, S. 35). Die Kommunikation im Änderungsprozess wird unterstützt, indem beteiligte Personen automatisch über Änderungen informiert werden, Dokumente zugesandt bekommen oder bezüglich Fristen und Terminen Erinnerungen erhalten (Aßmann 2000, S. 127). Darüber hinaus werden Rückmeldungen von Personen hinsichtlich Machbarkeit oder Auswirkungen einer Änderung dokumentiert (Feldhusen et al. 2012b, S. 123; Jania 2004, S. 116–117).

Das Workflow-System übernimmt gleichzeitig die Steuerung und Dokumentation einer technischen Änderung, wobei aufgrund der Produkthaftung und Nachweispflicht insbesondere die Dokumentation von Informations-, Prüf- und Freigabeprozessen von Änderungen von Bedeutung sind (Gausemeier et al. 2006, S. 243–244). Mit der Nutzung von Workflow-Systemen im Änderungsmanagement können erhebliche Zeiteinsparungen realisiert (Feldhusen et al. 2012b, S. 123) und Prozesskosten gesenkt werden (Rickayzen et al. 2002, S. 41). Eine Studie zeigt, dass führende Unternehmen dreimal häufiger Workflow-Systeme verwenden um sicherzustellen, dass die richtigen Mitarbeiter zur Entscheidungsfindung herangezogen werden und diese zuverlässig und unmittelbar die relevanten Informationen übermittelt bekommen (Brown & Boucher 2007).

2.3 Daten technischer Änderungen

Strengere gesetzliche und technische Auflagen¹⁵ führen stetig zu neuen und gestiegenen Anforderungen in der technischen Produkt- und Änderungsdocumentation (Feldhusen et al. 2012b, S. 102). Für jede Änderung ist zu dokumentieren „*wer was wann und warum ändert bzw. geändert hat*“ (Gausemeier et al. 2006, S. 243).

Nach Lindemann & Reichwald (1998, S. 326) umfassen Änderungsdaten „*alle im Rahmen der Änderungsabwicklung anfallenden Informationen (z. B. Änderungsstammdaten, Änderungsauslöser, Änderungsursache, Änderungskosten, Termindaten)*.“

Voigt & Conrat Niernerg (1998, S. 252) klassifizieren diese Änderungsdaten wie folgt:

- **Änderungsstammdaten** dienen der Identifizierung der Änderung und enthalten eine Änderungsnummer und Kurzbeschreibung.
- **Änderungsauslöser** beschreiben den Anlass der Änderung, beruhend auf einer Soll/Ist-Abweichung, sowie die Einschätzung bzgl. der Notwendigkeit der Änderung.
- **Änderungsursache** beschreibt und klassifiziert den Sachverhalt der zu einer Soll/Ist-Abweichung geführt hat.
- **Änderungskosten** sind monetäre Auswirkungen von Änderungen auf wettbewerbsrelevante Ressourcen inklusive der Opportunitätskosten für zeitlichen Verzögerungen.

¹⁵ Vgl. Produkthaftungsgesetz 1989, Elektro- und Elektronikgerätegesetz 2005 und DIN EN ISO 9000:2015.

- **Terminaten der Änderungsabwicklung** beinhalten Daten für einzelne Schritte im Änderungsprozess.

Aufgrund der Inhomogenität von Änderungsdaten und -prozessen unterschiedlicher Unternehmen und der Motivation, einen unternehmensübergreifenden Austausch von Änderungs- und Produktdaten zu ermöglichen, wurde in Zusammenarbeit des VDA und ProSTEP iViP ein Standard für Änderungsdaten entwickelt. Gemäß diesem findet der Austausch von Produktdaten basierend auf der Norm ISO 10303-21:2016 (STEP¹⁶) statt. Über das Anwendungsprotokoll der ISO 10303 AP214 können änderungsbezogene Daten wie Änderungsanträge und Änderungsaufträge übermittelt und kommuniziert werden (Wasmer et al. 2011, S. 535). Das Datenmodell ist in der formalen Sprache EXPRESS-G spezifiziert, die in ISO 10303-11:2004 genauer definiert ist. Das entwickelte Änderungsdatenmodell enthält alle relevanten Attribute und Beziehungen zu Produktdaten und Dokumenten, die in einem unternehmensübergreifenden Änderungsprozess zwischen Stakeholdern kommuniziert werden (Wasmer et al. 2011, S. 537). Eine vereinfachte Darstellung des Änderungsdatenmodells ist in Abbildung 2-4 visualisiert.

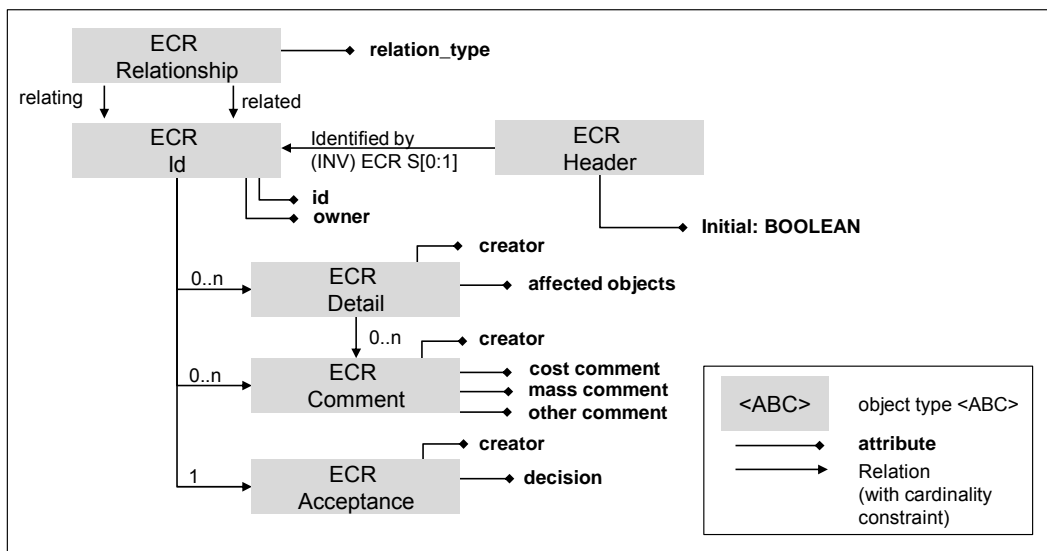


Abbildung 2-4: Vereinfachtes Änderungsdatenmodell nach Wasmer et al. 2011 (S. 540)

Zu den dargestellten Objekten in Abbildung 2-4 gibt es jeweils weitere Attribute. So enthält bspw. der „Header“ alle generellen Informationen über eine Änderung: Änderungstyp, Begründung der Änderung, Typ des Änderungsprozesses, Kostenübernahme etc. Für eine detaillierte Beschreibung aller Objekte und Attribute sei an dieser Stelle auf den Anhang der VDA 4965-0:2010 verwiesen. Bei der Erstellung des Änderungsantrags, jedem Statuswechsel und der Eingabe von Kommentaren erfolgt zusätzlich die Speicherung von Datum und Uhrzeit sowie des

¹⁶ STEP steht für „Standard for the Exchange of Product model data“ und ist ein Standard zur Beschreibung Produktdaten, der in der ISO 10303-21:2016 definiert ist.

Mitarbeiters und dessen Organisationseinheit (VDA 4965-0:2010, S. 63). Das Änderungsdatenmodell ist stark prozessorientiert und beinhaltet somit neben Änderungsdaten auch detaillierte Daten über den Änderungsprozess.

Wickel & Lindemann (2014) untersuchen auf Basis von Studien und einer Literaturrecherche, welche Daten typischerweise in Änderungsprozessen dokumentiert werden, und klassifizieren diese in Änderungsdaten und Änderungsprozessdaten. Hierbei orientiert sich die Datenstruktur am zugrundeliegenden Änderungsprozess und zugehörigen Aktivitäten mit dem Ziel, eine lernorientierte Auswertung des Änderungsprozesses zu ermöglichen.

Die **Änderungsdaten** beschreiben hierbei technische Änderungen und deren Entstehungs- und Auswirkungsbereich (Wickel & Lindemann 2014a):

- *Attribute der Änderung*: Kontext des Änderungsbedarfs (Grund, Auslöser, Zeitpunkt...) und Eigenschaften der Änderungen (ID, Status, Klassifikation...)
- *Umfang der Änderung*: betroffene Bauteile, Baugruppen, Zeichnungen, Software, etc.
- *Auswirkungen der Änderung*: Erwartete Auswirkungen bezüglich Kosten, Zeit und Qualität zur Änderung des identifizierten Änderungsumfangs
- *Status*: Genehmigung der Änderung (genehmigt, abgelehnt oder Rücksprung im Prozess).

Die **Änderungsprozessdaten** umfassen wer (Mitarbeiter, Rolle und Unternehmensbereich), wann (Zeitstempel bestehend aus Datum und Uhrzeit) welche Aktivität im Änderungsprozess tätig und welche Änderungsdaten hierbei betroffen waren.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Änderungs- und Änderungsprozessdaten wie folgt definiert:

***Änderungsdaten** umfassen alle bei einer Änderung entstehenden Daten die die technische Änderung beschreiben. Hierzu zählen insbesondere Änderungsattribute (z. B. Änderungsursache, -auslöser und Zeitpunkt), der Umfang der Änderung (z. B. Bauteile, Baugruppe, Zeichnungen) und Auswirkungen (z. B. Änderungskosten, -dauer).*

***Änderungsprozessdaten** umfassen alle bei einer Änderung entstehenden prozessbezogenen Daten. Insbesondere wer (z. B. involvierte Mitarbeiter und Unternehmensbereich), wann (z. B. Zeitstempel, Phase im Entwicklungsprozess) welche Aktivität vorgenommen hat.*

2.4 Methoden zur Bewertung von Änderungsauswirkungen

In der Produktentwicklung werden Methoden angewendet, um bestimmte Problemstellungen zielorientiert zu lösen und komplexe Sachverhalte besser handhaben zu können (Lindemann 2009, S. 57–58). Im Änderungsmanagement unterstützen Methoden insbesondere die Strategien der Vorverlagerung, Vermeidung, Effektivität und Effizienz sowie des Lernens (s. Kapitel 2.1.3). In einer umfangreichen Literaturstudie (vgl. Hamraz et al. 2013a) an der University of

Cambridge wird der Einsatz von Methoden in drei zeitliche Bereiche eingeteilt: vor, während und nach einer Änderung.

Der Großteil der Methoden wird hierbei der Phase „während der Änderung“ und demzufolge dem Änderungsprozessen zugeordnet. Hierbei handelt es sich um Methoden zur Klassifikation, Lösungsentwicklung, Auswirkungsanalyse, Genehmigung, Implementierung sowie Dokumentation und zum Review von Änderungen (Hamraz et al. 2013a, S. 478). Daneben adressieren nur wenige Methoden die Phasen vor und nach einer Änderung mit dem Ziel, auftretende Änderungen zu reduzieren, zu vermeiden oder aus ihnen zu lernen (Hamraz et al. 2013a, S. 479). Für die vorliegende Problemstellung sind insbesondere Methoden zur Auswirkungsanalyse von Änderungen relevant, die sich in Bezug zur eigentlichen Änderungsdurchführung in a priori (von vornherein) und a posteriori (nachträglich)¹⁷ einteilen lassen.

2.4.1 A priori Analyse von Änderungsauswirkungen

Die a priori Analyse von Änderungsauswirkungen ist eine zentrale Aktivität im Änderungsmanagement, insbesondere für die effektive Auswahl und effiziente Umsetzung von Änderungen (Hamraz et al. 2013c, S. 142). Sie stellt insbesondere dann eine der Schlüsselherausforderungen im technischen Änderungsmanagement dar, wenn Änderungen komplexe technische Produkte betreffen.

Häufig geht mit der Entwicklung komplexer technischer Produkte ein ebenso komplexer Entwicklungsprozess (vgl. Simultaneous Engineering) einher (Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 227–229). Daraus resultiert, dass technische Änderungen sowohl Anpassungen am Produkt als auch an Entwicklungsaktivitäten bedingen können oder zu Iterationen im Entwicklungsprozess führen. Das Phänomen, dass durch technische Änderungen weitere Änderungen auf Produkt- und Prozessebene verursacht werden, wird als Änderungsausbreitung bezeichnet („Change Propagation“, vgl. Kapitel 2.1.1). Da Abhängigkeiten zwischen Elementen¹⁸ die Änderungsausbreitung bestimmen, werden häufig modellbasierte Ansätze basierend auf Struktur- oder Netzwerkmodellen verwendet. Hierbei wird zwischen szenario- oder simulationsbasierten Ansätzen unterschieden. Mit ersteren können die Änderungen antizipiert und deren Ausbreitung über „was-wäre-wenn Szenarios“ abgeschätzt werden (z. B. Koh et al. 2012; Wilds 2008) mit zweiteren lassen sich strukturbasierte Modelle um zusätzliche Daten, wie bspw. die Wahrscheinlichkeiten der Änderungsausbreitung oder die Höhe der Änderungsauswirkung erweitern (vgl. Clarkson et al. 2004).

Wynn et al. (2014) untergliedern Ansätze zur a priori Analyse in produkt- und entwicklungsprozessorientierte Ansätze. Der größte Teil der Forschung im Bereich der Änderungsausbreitung konzentriert sich dabei auf rein **produktorientierte Ansätze**. Die meist zitierte Methode stellt hierbei die „Change Prediction Method (CPM)“ dar (Clarkson et al. 2004), die ursprüng-

¹⁷ Die Definition richtet sich ausdrücklich nach der bildungssprachlichen Verwendung von a priori und a posteriori. Demnach bedeuten diese vornherein bzw. nachträglich gemäß Duden (2016a) und (2016b).

¹⁸ Bspw. Bauteile, Komponenten oder Module eines technischen Produkts.

lich nur Relationen über physische Zusammenhänge abbildete und bis dato zahlreiche Erweiterungen aufweist. Ariyo et al. (2007) erweiterten das Modell von Clarkson et al. (2004) durch die Verwendung verschiedener Produktstrukturebenen. Zudem bestehen Erweiterungen hinsichtlich der Domänen und Relationsarten, wodurch eine domänenübergreifende Analyse verschiedener Änderungsausbreitungen ermöglicht wird (Hamraz 2013; Koh et al. 2009, S. 271). Entsprechende Domänen beinhalten Produkteigenschaften, Features und Komponenten eines Produktmodells. Neben den CPM-basierten Ansätzen gibt es weitere Methoden zur Bestimmung der Änderungsausbreitung. Köhler (2009) nutzt ein Produktmodell auf Basis des „Characteristics-Properties Modelling“ Ansatzes von Weber (2005a), das zwischen Merkmalen und Eigenschaften eines Produkts unterscheidet, wodurch eine Änderungsausbreitung sowohl über das Verhalten als auch interne Abhängigkeiten abgebildet werden kann. Weitere Ansätze nutzen bspw. das STEP-Format oder verwenden Schlüsselkomponente und -attribute eines Produkts (Cohen et al. 2000; Ollinger & Stahovich 2004; Reddi & Moon 2009).

Während sich zunächst die Forschungsaktivitäten auf Abhängigkeiten zwischen Komponenten und Systemen fokussierten, werden in neueren Ansätzen zunehmend Abhängigkeiten zum Entwicklungsprozess adressiert. Mit diesen **entwicklungsprozessorientierten Ansätzen** werden Ausbreitungen technischer Änderungen, bspw. in Form von Überarbeitungen oder Wiederholungen von Tätigkeiten, auf den Entwicklungsprozess untersucht. Ahmad et al. (2013) stellen hierzu eine Methode vor, die änderungsbedingte Abhängigkeiten zwischen Anforderungen, Funktionen- und Komponentenstruktur sowie einem detaillierten Entwicklungsprozess berücksichtigt. In dem Ansatz von Ouertani (2008) werden Abhängigkeiten zwischen dem Entwicklungsprozess und Produktdaten in einem Datennetzwerk erfasst, mit dem anschließend Überarbeitungszyklen im Entwicklungsprozess identifiziert werden können. Darüber hinaus ermöglichen weitere Ansätze die Bestimmung von Ausbreitungen technischer Änderungen auf die Entwicklungsdauer (Chua & Hossain 2012) oder den Kosten- und Ressourcenverzehr des laufenden Entwicklungsprozesses (Li & Moon 2012; Wynn et al. 2014). Der Ansatz von Wynn et al. (2014) basiert auf der CPM (vgl. Clarkson et al. 2004) und verwendet eine Monte-Carlo-Simulation um u. a. das Risiko zur Überschreitung des Zeitplans und die Aufwandsverteilung für Aktivitäten im Änderungsprozess vorherzusagen.

Neben Methoden, die ausschließlich Auswirkungen auf Produkte und Prozesse adressieren, unterstützen einige auch die Bewertung dieser Auswirkungen hinsichtlich Kosten (z. B. Ahmad et al. 2009a; Ahmadinejad & Afshar 2014) sowie Kosten und Marktpotenzial (Belt et al. 2015), Entwicklungs- und Änderungsdauer (z. B. Chua & Hossain 2012; Li & Moon 2012; Wynn et al. 2014), Qualität (Koh et al. 2009; Ollinger & Stahovich 2004) und Risiko (Conrad et al. 2007).

Die Methoden zur a priori Analyse von Änderungsauswirkungen basieren, abgesehen von wenigen Ausnahmen, auf einer interviewbasierten Erstellung der zugrundeliegenden Struktur- und Simulationsmodelle. Durch die Einbindung von Experten werden sämtliche Abhängigkeiten in den Modellen erfahrungsbasiert abgeschätzt, wodurch die Methoden in der Regel mit sehr hohem Aufwand verbunden sind. Clarkson et al. (2004) benötigen bspw. für das Modell eines Helikopters, bestehend aus 19 Subsystemen, über 20 Stunden. Nur wenige Ansätze nutzen andere Methoden der Informationsakquise (vgl. Anhang Tabelle 10-2).

2.4.2 A posteriori Analyse von Änderungsauswirkungen

Im Bereich der a posteriori Analyse von Änderungsauswirkungen gibt es im Gegensatz zur a priori Analyse, weit weniger Ansätze. Diese entstanden mit wenigen Ausnahmen innerhalb der letzten 10 Jahre und lassen sich auf die Zunahme von Workflow-Systemen zurückführen, die die Verfügbarkeit von Änderungsdaten erhöhten.

Das Ziel einer a posteriori Analyse ist in erster Linie ein Erkenntnisgewinn über Änderungen und deren Auswirkungen, nachdem diese abgeschlossen sind. Diese Erkenntnisse werden in nachfolgenden Entwicklungsprojekten verwendet, um Verbesserungen in folgenden Bereichen zu erzielen:

- Änderungsmanagement (vgl. Reichwald & Conrat Niernerg 1996; Sharafi 2013)
- Produktentwicklungsprozess (Chang et al. 2011; Vianello & Ahmed 2008)
- Produkt und Produktarchitektur (Siddiqi et al. 2011)

Die Ansätze lassen sich entsprechend ihrer zugrundeliegenden Analysemethoden in strukturelle und statistische Auswertungen von Änderungen unterscheiden.

Ansätze, die **deskriptive statistische Analysen** verwenden, beschreiben Änderungsauswirkungen und stellen diese typischerweise in Tabellen, Histogramme, Kenngrößen und Grafiken dar (Sharafi 2013, S. 160). Häufig werden Ursachen von Änderungen und deren Auftretenszeitpunkt im Entwicklungsprozess (Ahmed-Kristensen & Kanike 2007; Vianello & Ahmed 2008) sowie Ursachen in Bezug zu den Änderungskosten (Chang et al. 2011; Reichwald & Conrat Niernerg 1996) analysiert. Dieser Zusammenhang erhöht das Verständnis über Änderungskosten und zeigt ursachenbezogen Verbesserungspotenziale im Entwicklungsprozess auf (Reichwald & Conrat Niernerg 1996). In einer systematischen Analyse von 1.100 Änderungsmitteilungen bei BP untersuchen Siddiqi et al. (2011) den Zusammenhang zwischen Kosten, Zeitpunkt und Herkunft (initiierendes Subsystem) von Änderungen.

Der zweite Teil der Ansätze stützt sich auf **strukturelle Analysen**, die häufig einen explorativen Charakter aufweisen, da zuvor unbekannte Zusammenhänge identifiziert werden. Folgende Zusammenhänge stehen im Vordergrund der Analysen:

- Änderungsbedingten Abhängigkeiten zwischen Modulen eines Systems (Sharafi 2013, S. 195–200)
- Interdependenzen zwischen Änderungen und deren Ausbreitungsmotiven (Giffin et al. 2009)
- Änderungsausbreitung auf Mitarbeiter- oder Abteilungsebene (Pasqual & de Weck 2012; Sharafi 2013, S. 205–206)
- Ähnlichkeiten in textuellen Änderungsbeschreibungen (Elezi et al. 2011; Sharafi 2013, S. 244–246)

Für die strukturellen Analysen werde Data Mining Methoden eingesetzt, deren Einsatz gleichzeitig eine Verarbeitung großer Datenmengen an Änderungen erlaubt. So analysieren Giffin et al. (2009) bspw. 41.500 Änderungen, die innerhalb eines Entwicklungsprojekts für einen komplexen Sensors aufgetreten sind. Einen ähnlich großen Datensatz verwendet Sharafi (2013), der insgesamt 53.000 Änderungsanträge für seine Analysen nutzt.

3. Methodische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die methodischen Grundlagen für die datenbasierte Analyse von Änderungsausbreitungen in Produktstrukturen beschrieben. Diese Grundlagen umfassen auf der einen Seite die Modellierung und Analyse von Änderungsstrukturen, auf der anderen Seite die Identifikation von Produkt- und Änderungsstrukturen in Unternehmensdaten.

3.1 Modellierung und Analyse von Produkt- und Änderungsstrukturen

Um ein Verständnis über komplexe Systeme zu erlangen, eignen sich modellhafte Abbildungen (Haberfellner 2012, S. 33–41) und eine strukturorientierte Betrachtung dieser (Haberfellner 2012, S. 132). Im Systems Engineering werden sie als ein unverzichtbares Werkzeug zur Analyse komplexer Strukturen und Relationen angesehen (Kossiakoff et al. 2011, S. 379). Ein gutes Modell kann dabei unterstützen, Auswirkungen von Handlungen vorherzusagen und Hypothesen zu testen (Browning 2002, S. 181). Dabei stellen Modelle stets eine vereinfachte Abbildung eines Originals dar, das über Analogien wiederum Rückschlüsse auf dieses zulässt (Lindemann 2009, S. 333). Welche Aspekte dieses Modell aufweist, ist abhängig vom zu untersuchenden Problem und der Zweckdienlichkeit (Haberfellner 2012, S. 132).

Technische Produkte sind häufig die Summe komplexer Interaktionen zwischen Bauteilen und Systemen¹⁹ (Weber 2005b, S. 1). Hierbei interagieren einzelne Bauteile mit Bauteilen und Systemen und diese wiederum mit weiteren Systemen. Daraus resultieren Änderungen, die häufig zu Änderungsausbreitungen führen, indem die Änderung an einem einzelnen Bauteil oder System Änderungen an weiteren Bauteilen oder Systemen nach sich zieht (Eckert et al. 2004, S. 10). Der Umgang mit Komplexität ist eine Herausforderung, da Folgen einer Handlung, wie bei technischen Änderungen, schwer vorhersehbar sind (Lee 2003, S. 30). Zur modellhaften Darstellung von Abhängigkeiten und Zusammenhängen in komplexen technischen Produkten eignen sich Methoden zur Strukturmodellierung. Hierzu zählen matrix-, graphen- und netzwerk-basierte Modellierungsmethoden (vgl. Browning 2016, Kreimeyer 2010, S. 37), die im Folgenden vorgestellt werden.

3.1.1 Strukturelles Komplexitätsmanagement

Eine in Forschung und Industrie weit verbreitete Modellierungsmethode für komplexe Sachverhalte ist die **Design Structure Matrix (DSM)**²⁰, welche erstmals im Jahre 1981 durch Steward (1981) publiziert wurde. Sie eignet sich zur Modellierung und Analyse von Strukturen

¹⁹ Die Erzeugung komplexer technischer Produkte ist laut Weber (2005b) eine Strategie, um im globalen Wettbewerb einen hohen Preis am Markt zu erzielen und damit hohe Entwicklungs- und Produktionskosten zu decken.

²⁰ Eine ganze Community beschäftigt sich mit dem Forschungsfeld der „Design Structure Matrix“: www.dsm-web.org.

beliebiger Systeme (Haberfellner 2012, S. 377), wobei unterschiedliche Arten von DSMs genutzt werden. Während binäre DSMs bspw. nur das Vorhandensein einer Relation zwischen zwei Elementen beschreiben, bringen numerische DSMs zudem eine Gewichtung ein, die die Stärke der Relation quantifiziert. Zudem können Relationen gerichtet oder ungerichtet sein (Browning 2016, S. 1). Ungerichtete DSMs sind symmetrisch, so dass nur eine Hälfte der DSM betrachtet werden muss. In der gerichteten DSM sind beide Hälften relevant zur Realisierung einer Richtungsabhängigkeit.

Basierend auf einer Literaturstudie leitet Browning drei Haupttypen und zwei Klassen von DSM-Anwendungen ab: Produkt-, Organisations- und Prozessmodelle bzw. statische und temporale Anwendungen (Browning 2001, S. 292-293, 2016, S. 2).

- Die **Produktstruktur oder Produktarchitektur** wird verkörpert durch Komponenten eines Produkts und deren gegenseitigen Relationen sowie Relationen zur Umwelt. Relationen zwischen Komponenten können vielfältig sein, z. B. räumlich oder energetisch. Diese beinhalten mindestens die hierarchische Untergliederung eines Produkts in Module und Komponenten, eine Zuordnung von Funktionen zu Komponenten und Modulen sowie die Relationen zwischen Komponenten und Modulen (Eppinger & Browning 2012, S. 18–24).
- Modelle von **Organisationsstrukturen** beinhalten Personen, deren Relationen zueinander und zur Umgebung der Organisation. Generell bestehen Organisationen aus Organisationseinheiten wie Teams, Abteilungen oder Einzelpersonen mit Verantwortlichkeiten (Eppinger & Browning 2012, S. 79–87). Relationen erfassen die Zuordnung von Aufgaben und Verantwortlichkeiten zu Organisationseinheiten, die hierarchische Untergliederung sowie laterale Verbindungen zwischen Organisationseinheiten, bspw. durch Kommunikation.
- Die **Prozessstruktur**, auch Prozessarchitektur genannt, besteht aus Aktivitäten und deren Interaktionen, die ausgeführt werden, um eine Projekt- oder Unternehmensfunktion zu erfüllen. Hierbei werden insbesondere die hierarchische Untergliederung des Prozesses in Aktivitäten, Input-Output Relationen zwischen Aktivitäten und weitere Relationsarten berücksichtigt (Eppinger & Browning 2012, S. 129–141).

Eine Erweiterung der DSM stellt die **Domain Mapping Matrix (DMM)** dar, die Relationen zwischen zwei Domänen erlaubt (Danilovic & Browning 2007, S. 304–309). DMMs finden Anwendung, wenn Relationen zwischen zwei unterschiedlichen Domänen betrachtet werden. Häufig sind dies Relationen zwischen den Domänen Produkt, Prozess, Organisation, Tools und Ziele. Auch innerhalb einer Domäne können Subdomänen mit DMMs beschrieben sein, bspw. die Subdomänen Komponenten und Funktionen der Domäne Produkt (Browning 2016, S. 10–11).

Die **Multiple Domain Matrix (MDM)** ermöglicht die Modellierung eines ganzen Systems bestehend aus mehreren Domänen und zugehörigen Elementen, die durch unterschiedliche Relationsarten verbunden werden (Maurer 2007). Ein Vorteil der MDM Methodik ist, dass Relationen zwischen mehr als einer Domäne in einer DSM aggregiert werden können.

Maurer (2007, S. 112–118) beschreibt sechs Fälle, wie aus nativen DSMs und DMMs eine DSM berechnet werden kann. Diese Fälle unterstützen die Datenakquise, indem Alternativen zu nativen Daten aufgezeigt werden.

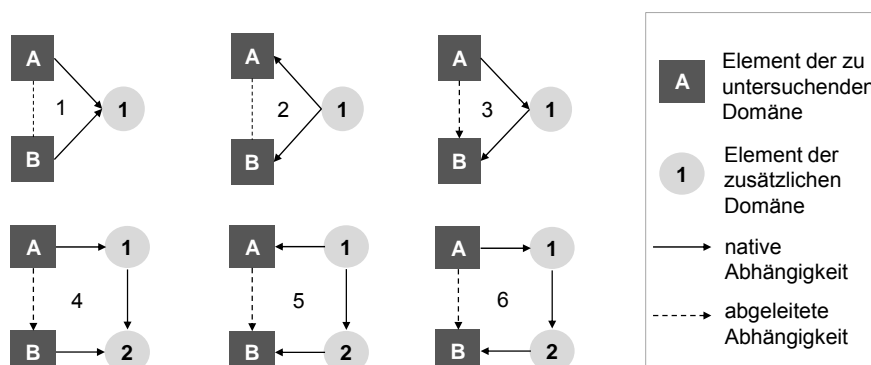


Abbildung 3-1: Ableiten von DSMs basierend auf der DMM und MDM Logik (Maurer 2007, S. 85)

Anfänglich beschränkte sich die Anwendung von MDMs auf die Erstellung und Verifikation von DSMs und DMMs. In weiteren Anwendungen wurden diese unter anderem zur Unterstützung der Änderungsausbreitung oder des Wissensmanagements eingesetzt, da diese Bereiche weitreichende Implikationen in Unternehmen haben (Browning 2016, S. 11–12). Eine MDM-basierte Methodik zur Erstellung von Wissenslandkarten ist in Wickel et al. (2013b) beschrieben.

Zur Analyse von DSMs werden Analysestrategien verwendet (Browning 2001, 2016). Für statische DSMs eignet sich klassischerweise das Clustering zur Identifikation stark vernetzter Elemente und in dynamischen DSMs die Sequenzierung, das Tearing und Banding. Beim Sequenzieren werden Reihen und Spalten einer ablauforientierten DSM vertauscht, so dass möglichst wenige Relationen unter der Diagonalen bleiben, wodurch Rücksprünge reduziert werden. Beim Tearing werden Relationen ermittelt, die die Sequenzierung von DSMs hemmen, um diese anschließend zu entfernen. Das Banding hat zum Ziel, Reihen und Spalten so zu vertauschen, dass Blöcke von parallelen Elementen verbleiben, die unabhängig voneinander sind und sich in Prozessanalysen für Parallelisierungen eignen. Eine Übersicht und detaillierte Beschreibung dieser und weiterer Analysen findet sich in Maurer (2007, S. 225–231) und Browning (2016, S. 34–36).

Die Forschung zu MDMs steckt noch in ihren Anfängen und es ist noch nicht geklärt, wie sich MDMs bestehend aus statischen und temporalen DSMs bestmöglich analysieren lassen (Browning 2016, S. 12). Laut Browning (2016) hat die MDM Methodik eine vielversprechende Zukunft in den Bereichen Big Data, Data Science und Data Analytics, da dort eine große Anzahl an Elementen je Domäne erfasst und in Bezug zu weiteren Domänen analysiert werden kann, wodurch sich unter anderem Muster, Cluster und Segmente extrahieren lassen.

Neben den Analysestrategien für DSMs existieren weitere Systemanalysen, die die Extraktion und Interpretation von charakteristischen Mustern in Strukturen umfassen (Maurer 2007, S. 122–135). Diese werden als **Strukturmerkmale** bezeichnet, beschreiben eine Konstellation von Elementen und Relationen bzw. Relationen und Kanten in einem System und basieren mathematisch auf der Graphentheorie (vgl. Kap. 3.1.2). Nach Maurer (2007) können Struktur-

merkmale für die Charakterisierung einzelner Elemente oder Relationen, Teilsysteme oder ganzer Systeme verwendet werden. Eine Übersicht dieser Strukturmerkmale ist in Tabelle 3-1 dargestellt. In unterschiedlichen Strukturmodellen (z. B. Produkt- oder Prozessstruktur) und in Abhängigkeit von der Relationsart haben diese allerdings eine unterschiedliche Bedeutung und müssen im Kontext richtig interpretiert werden (Maurer 2007, S. 122–133). Zudem wird eine Kombination von Strukturmerkmalen empfohlen, da eine isolierte Anwendung eines einzelnen Merkmals zu einer fehlerhaften Interpretation führen kann (Lindemann et al. 2009, S. 143).

Tabelle 3-1: Übersicht Strukturmerkmale nach Lindemann et al. (2009)

Strukturmerkmale	
Knoten und Kanten	Aktivsumme, Aktivität, Gelenkknoten, Erreichbarkeit, Brückenkante, Bus, Nähe, Kritikalität, Endknoten, Isolierte Knoten, Blattknoten, Passivsumme, Startknoten, Transitknoten
Teilsysteme	Doppelt verbundene Komponenten, Cluster, Distanz, Rückkopplung, Hierarchie, Umgebung, Pfad, Mengen indirekter Abhängigkeiten, Ähnlichkeit, Spannbaum, stark verknüpfte Teilsysteme
Systeme	Banding, Clustern, Vernetzungsgrad, Distanzmatrix, Matrix indirekter Abhängigkeiten, Triangularisierung

Durch Strukturmerkmale können Handlungsschwerpunkte im System identifiziert werden, für die geeignete Optimierungsmaßnahmen bzw. eine verbesserte Systemhandhabung abgeleitet werden kann. Maurer (2007, S. 135–136) schlägt hierfür den Einsatz eines Strukturhandbuchs vor, mit welchem strukturelle Änderungen sowie resultierende Auswirkungen analysiert und vorhergesagt werden können. Für die grundlegende Optimierung eines bestehenden Systems wird eine ABC-Analyse kombiniert mit einem Tearingansatz oder evolutionärem Algorithmus empfohlen. Dadurch werden Elemente und Relationen mit dem größten Einfluss identifiziert und hindernde Elemente oder Relationen eliminiert (Maurer 2007, S. 135–136).

Weiterhin können Systeme durch Metriken und Kennzahlen charakterisiert werden. Diese stellen „relevante Zusammenhänge in verdichteter, quantitativ messbarer Form“ dar (Horváth 2011, S. 499), um eine aktuelle Situation reduziert und effizient zu beschreiben (Kreimeyer 2010, S. 79). Für Metriken im Kontext von Entwicklungsprozessen sei auf Kreimeyer (2010) verwiesen, zur Beschreibung der Produktkomplexität auf Summers & Shah (2003) und Bashir & Thomson (1999). Für die Analyse komplexer Systeme entwickelte Maurer (2007) ein Vorgehen, das sich in fünf Schritte untergliedert: Systemdefinition, Informationsakquise, Ableiten von Zusammenhängen, Strukturanalyse und praktische Umsetzung.

3.1.2 Graphentheorie

Die Graphentheorie ist ein Teilgebiet der Mathematik, das sich mit der Untersuchung von Graphen und deren Eigenschaften beschäftigt. Graphen bilden netzartige Strukturen in mathematischen Modellen ab und beinhalten stets zwei unterschiedliche Mengen von Objektarten: Knoten und Kanten. Graphen werden bestimmt durch Knoten und Kanten sowie der Zuordnung von Knoten zu Kanten. Informationen über Eigenschaften von Knoten und Kanten werden nicht

berücksichtigt, so dass die Modelle abstrakt bleiben (Gross & Yellen 2004; Turau & Weyer 2015). Die Graphentheorie fokussiert rein topologische Fragestellungen von Strukturen, bspw.:

- Wie viele Kanten liegen mindestens zwischen zwei Knoten?
- Wie viele Knoten/Kanten können entfernt werden, ohne dass der Graph wichtige Eigenschaften oder seinen Zusammenhalt verliert?
- Wie viele Kanten haben keinen gemeinsamen Knoten?

Die wichtigsten Grundbegriffe bezüglich Graphen, Kanten und Knoten sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Zusammenfassung wichtiger Begrifflichkeiten der Graphentheorie

Kategorie	Topologie	Beschreibung
Graph	Gerichteter Graph	Graph besteht aus Knoten und gerichteten Kanten.
	Ungerichteter Graph	Graph besteht aus Knoten und ungerichteten Kanten.
	Schlichter Graph	Graph besitzt weder Schlingen noch parallele Kanten.
	Gewichteter Graph	Besitzt gewichtete Kanten und Knoten.
	Multigraph	Zwei Knoten können durch mehrere Kanten verbunden sein.
	Hypergraph	Eine Kante kann mehr als zwei Endknoten besitzen.
Kanten	Schlingen	Kanten, deren Endknoten zusammenfallen.
	Gerichtete Kante	Bestimmt durch zwei Endknoten und einen Richtungssinn.
	Ungerichtete Kante	Bestimmt durch zwei Endknoten ohne Richtungssinn.
	Parallele Kanten	Kanten zwischen denselben Endknoten.
	Adjazente Kanten	Haben einen gemeinsamen Knoten und sind „benachbart“.
	Gewichtet Kanten	Der Kante wird eine reelle Zahl als Kantengewicht zugeordnet.
Knoten	Grad	Anzahl der einem Knoten zugeordneten Kanten (Schlingen zählen doppelt); Differenzierung von ein- und ausgehenden Kanten möglich.
	Adjazente Knoten	Benachbarte Knoten, die durch eine Kante verbunden sind.
	Gewichteter Knoten	Dem Knoten wird eine reelle Zahl als Knotengewicht zugeordnet.

Weiterhin können Graphen bestimmte Basisstrukturen aufweisen, anhand derer sie beschrieben werden (Kreimeyer 2010; Turau & Weyer 2015):

- **Pfad (Kantenfolge):** Eine bestimmte Reihenfolge von adjazenten Kanten. Die Länge des Pfades ist die Anzahl der Kanten einer Folge. Ein Zyklus (oder geschlossene Kantenfolge) stellt einen Spezialfall dar, in dem der Pfad mit dem gleichen Knoten startet und endet. Der Weg ist ebenfalls ein Sonderfall, der einen Pfad beschreibt, indem jeder Knoten höchstens einmal auftritt.

- **Wald und Bäume:** Graphen, die keine Zyklen besitzen, werden Wald genannt. Ein zusammenhängender Graph ohne Zyklen wird Baum genannt.
- **Cliquen:** Sind Untergraphen, innerhalb derer jeder Knoten mit jedem Knoten durch Kanten verbunden ist. Untergraphen sind echte Teilmenge eines Graphen.
- **Zusammenhängende Graphen:** Jeder Knoten kann von jedem Knoten aus erreicht werden.
- **Isolierte Knoten:** Besitzen keine Nachbarknoten und haben einen Knotengrad von Null.

Ein Graph kann als Adjazenzmatrix abgebildet werden, in der in jedem Matrixelement a_{ij} die Anzahl der direkten Verbindungen zwischen den Knoten i und j dargestellt wird. Da die meisten Programmiersprachen Matrizen unterstützen, erleichtern diese die Speicherung sowie weitere Verarbeitung (Illik 2009, S. 151).

In schlichten Graphen beinhalten die Matrixeinträge nur 0 und 1, da diese keine Mehrfachkanten und Schlingen besitzen. Ist der Graph ungerichtet, ist die Matrix stets symmetrisch. Der Knotengrad ist gleich der Summe einer Spalte oder Zeile (Illik 2009, S. 153). Graphen können auch in Kantenlisten oder Adjazenzlisten abgebildet werden, in welchen alle Kanten durch ihre verbundenen Knoten aufgelistet werden. Falls es mehrere gleiche Kanten gibt, werden diese mehrmals aufgelistet. Adjazenzmatrizen sind DSMs sehr ähnlich (siehe Kapitel 3.1.1). Die Graphentheorie stellt die Basis für Strukturanalysen und zur Beschreibung großer Netzwerke (Kreimeyer 2010, S. 48).

3.1.3 Netzwerktheorie

Netzwerk- und Graphentheorie sind eng verwobene Forschungsgebiete. Die Graphentheorie als Teilgebiet der Mathematik beschäftigt sich insbesondere mit der formalen Modellierung und Analyse von Interaktion einzelner Knoten und Kanten (Newman 2003b, S. 169). Die Netzwerktheorie hingegen nutzt Graphen um reale Systemstrukturen abzubilden, Eigenschaften zu identifizieren und darauf aufbauend Vorhersagen bezüglich des Systemverhaltens zu treffen (Stegbauer 2010). In den letzten Jahrzehnten fand eine Weiterentwicklung zu statistischen Auswertungen sehr großer Netzwerke statt. Dies ist nicht zuletzt zurückzuführen auf die Verfügbarkeit und Analyse weit größerer Datenmengen und den daraus neu entstandenen Fragestellungen (Newman 2003b, S. 169–171). Gegenstand solcher Analysen sind häufig folgende Netzwerkarten:

- Soziale Netzwerke (z. B. Freunde, Organisationsstrukturen)
- Informations- und Wissensnetzwerke (z. B. akademische Kollaborationen)
- Technologische Netzwerke (z. B. Computernetzwerk)
- Biologische Netzwerke (z. B. genetische Regulationen)

Newman (2003b) und Costa et al. (2007, S. 377) identifizieren in einer Literaturstudie wichtige Eigenschaften und Messgrößen von Netzwerken, die häufig in Analysen verwendet werden:

Das Kleine-Welt-Netzwerk (engl. small-world network): Der Begriff weist die Analogie zum „Kleine-Welt-Phänomen“ aus der Sozialpsychologie auf, das bekannter ist als „six degrees of separation“ (Guare 1990). Demnach sind alle Menschen über relative kurze Pfade mit allen

Menschen der Welt verbunden. In der Netzwerktheorie erfolgt die Kalkulation über kürzeste Pfade zwischen zwei Knoten sowie die durchschnittliche Pfadlänge aller Pfade, welche zwei Knoten innerhalb eines Netzwerks verbinden (Watts & Strogatz 1998, S. 440–442). Je ausgeprägter das Kleine-Welt-Phänomen eines Netzwerks ist, desto schneller erfolgt die Verbreitung von Informationen (Kreimeyer 2010, S. 56).

Transitivität: Wenn Knoten A mit Knoten B verbunden ist und Knoten B mit C, dann besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass auch Knoten A mit C verbunden ist. Dieser Zusammenhang ist in vielen Netzwerken wiederzufinden. Für die Topologie eines Netzwerks bedeutet dies, dass viele Triaden vorhanden sind, d. h. drei Knoten, die jeweils miteinander verbunden sind. Quantifiziert wird die Transitivität über den „Clustering coefficient“, der die Dichte von Triaden in einem Netzwerk angibt (Newman 2003b, S. 183–185).

Verteilung der Knotengrade: Der Knotengrad entspricht der Anzahl an Relationen eines Knotens. Die Verteilung der Knotengrade in einem Netzwerk kann durch ein Histogramm dargestellt werden, das für jeden Knotengrad den Anteil an Knoten im Netzwerk aufführt. Dieser Anteil stellt gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit für den Knotengrad im Netzwerk dar. In „random graphs“ hat jede Kante die gleiche Wahrscheinlichkeit und die Verteilung ist demnach binominal. In realen Netzwerken ist es sehr unwahrscheinlich, dass Knotengrade eine gleiche Verteilung haben (Newman 2003b, S. 185).

Maximaler Knotengrad: Dieser hängt im Normalfall von der Netzwerkgröße ab. In einigen Netzwerkanalysen ist auch der minimale Knotengrad von Relevanz.

Robustheit von Netzwerken: Wenn Knoten aus einem Netzwerk entfernt werden, hat dies Auswirkungen auf Pfadlängen und ursprünglich verbundene Knoten werden getrennt. Netzwerke reagieren unterschiedlich auf das Entfernen von Knoten. Studien zeigen, dass die meisten großen Netzwerke gegen zufälliges Entfernen von Knoten robust sind; werden allerdings gezielt zentrale Knoten entfernt, zerbricht das Netzwerk (Newman 2003b, S. 189).

Mixing Pattern: Netzwerke haben häufig verschiedene Knotentypen und die Wahrscheinlichkeit einer Verknüpfung zwischen Knoten hängt vom Knotentyp ab. Dies ist Untersuchungsgegenstand bei „assortative mixing“ und „homophily“. Zum Beispiel haben Garfinkel (2002) und Newman (2003a) Daten von verheirateten und unverheirateten Paaren untersucht, um zu zeigen, dass es eine starke Korrelation zwischen dem Alter der Partner gibt. Es können grundsätzlich auch skalare Eigenschaften wie Alter oder Einkommen als Knotentyp verwendet werden (Newman 2003b, S. 192). Ein Sonderfall stellt hierbei „Degree Correlation“ dar. Hierbei bekommt der Knoten den Grad als skalare Eigenschaft zugewiesen, wodurch analysiert wird, ob Knoten höheren Grades häufiger verbunden sind.

Community Struktur: Insbesondere soziale Netzwerke weisen häufig eine „Community Struktur“ auf. Das bedeutet, dass es Knotengruppen im Netzwerk gibt, die eine besonders hoch Vernetzung zueinander und gleichzeitig eine geringere Vernetzung zu anderen Gruppen aufweisen. Gruppen werden durch „Cluster analysis“ identifiziert (Newman 2003b, S. 193–195).

Zentralität (Centrality): Die Zentralität stellt eine häufig verwendete Eigenschaft zur Beschreibung von Knoten als auch Netzwerken dar, welche auf Freeman (1979) zurückzuführen ist. Es werden i. d. R. drei Arten von Zentralitäten unterschieden. Die „Degree-Centrality“ bezieht sich auf die eingehenden und ausgehenden Kanten eines Knotens, die „Betweenness-

Centrality“ verdeutlicht, ob der Knoten auf einem kürzesten Pfad und dadurch zwischen vielen anderen Knoten im Netzwerk liegt. Die „Closeness-Centrality“ gibt die Distanz eines Knotens zum Rest des Netzwerks an und wird auch als die erwartete Erreichbarkeit des Knoten interpretiert.

Motifs: Sind Subgraphen bestehend aus einer Teilmenge an Knoten und zugehörigen Kanten eines Netzwerks mit einem bestimmten Vernetzungsmuster. Das Auftreten des Motifs im Netzwerk ist statistisch signifikant gegenüber randomisierten Netzen. Die Art des Motifs lässt Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Netzwerks zu (Milo et al. 2002, S. 824).

3.2 Methoden zur datenbasierten Identifikation von Änderungsstrukturen

Zur Identifikation von Strukturen (sogenannten Mustern) in großen Datenbeständen hat sich eine interdisziplinäre und relativ junge Forschungsdisziplin entwickelt. Diese beschäftigt sich mit der Extraktion von neuen und potentiell nützlichen Mustern in großen Datenbeständen (Fayyad et al. 1996a, S. 40–41). In der Wissenschaft haben sich hierfür die Begriffe Data Mining und Knowledge Discovery in Databases (KDD) etabliert.

3.2.1 Data Mining & Knowledge Discovery in Databases

Data Mining und KDD werden häufig synonym für den gesamten Prozess zur Muster- oder Wissenserkenntnis verwendet (Sharafi 2013, S. 68). Nach Fayyad et al. (1996b, S. 28) stellt Data Mining jedoch nur einen Schritt im übergeordneten Prozess dar, in dem die eigentliche Analyse der Daten unter Anwendung eines Data Mining Verfahrens durchgeführt wird. KDD umfasst hingegen den gesamten Prozess der Wissensgenerierung aus Datenbanken und schließt bspw. die Datenvorbereitung und Data Mining mit ein.

Für KDD gibt es unterschiedliche Prozesse, welche systematisch und geplant die Wissensentdeckung beschreiben. Eine vergleichende Übersicht über bestehende Prozesse und Aktivitäten ist in Kurgan & Musilek (2006, S. 5-7 bzw. S. 9-12) dargelegt. Das Prozessmodell von Fayyad et al. (1996b) ist das in Wissenschaft und Industrie am weitesten verbreitete (Kurgan & Musilek 2006, S. 14). Es besteht aus neun Phasen, die in Abbildung 3-2 entsprechend der Originalquelle, nicht vollständig aufgezeigt werden.

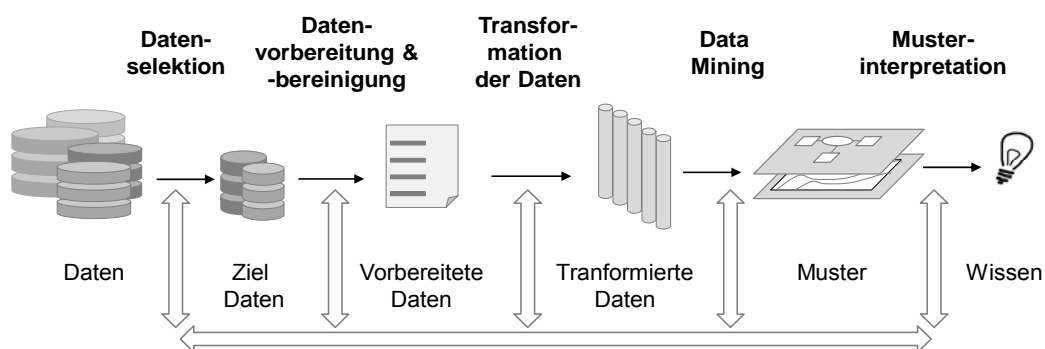


Abbildung 3-2: Phasen des KDD-Prozesses nach Fayyad et al. (1996b)

Der KDD-Prozess ist iterativ und erfordert häufig Vor- und Rücksprünge. Im Folgenden werden die Schritte des Vorgehensmodells kurz beschrieben (Fayyad et al. 1996b):

Zu Beginn des KDD-Prozesses wird ein Verständnis über die Anwendungsdomäne entwickelt und das Ziel für den Prozess festgelegt (*Domänenverständnis und Zieldefinition* – grafisch nicht dargestellt). Im nächsten Schritt findet die *Datenselektion* statt, die die Analysebasis für die nachfolgenden Schritte bereitet. Diesem folgt die *Datenvorbereitung und -bereinigung* sowie eine *Transformation der Daten* auf eine für die Analyse geeignete Repräsentation. Diese Schritte umfassen häufig bis zu 60 % der gesamten Aufwände eines KDD-Projekts (vgl. Kurgan & Musilek 2006, S. 17). Schließlich werden ein passendes *Data Mining Verfahren* ausgewählt und zugehörige Modelle, Algorithmen und Maßzahlen festgelegt, mit denen die gesetzten Ziele erreicht werden können. Nach der eigentlichen *Data Mining Analyse* werden die Ergebnisse visualisiert und interpretiert (*Musterinterpretation*), so dass sie schließlich für eine Wissensnutzung und Verteilung bereit stehen.

Ein weit verbreiteter Prozess stellt der „Cross Industry Standard Process for Data Mining“ (CRISP-DM) aus dem Jahre 2000 dar, der in Zusammenarbeit mehrerer Unternehmen entwickelt wurde (u. a. DaimlerChrysler AG (Deutschland) und SPSS Inc. (USA)) (Chapman et al. 2000). Dieses Vorgehen legt insbesondere Wert auf eine anfängliche Klärung des KDD-Projekts hinsichtlich der Problemstellung und Zielsetzung sowie auf eine Rückführung der Ergebnisse in das Unternehmen in geeigneter Form (Chapman et al. 2000, S. 10–11). Für eine umfangreiche Auflistung von Referenzen zu verschiedenen KDD-Prozessen mit industrieller und wissenschaftlicher Anwendung sei auf Kurgan & Musilek (2006, S. 13) verwiesen.

3.2.2 Data Mining Aufgaben und Verfahren

Prinzipiell wird Data Mining dazu eingesetzt, um Muster in großen Datenbanken zu erkennen (deskriptiv) oder ein Modell zu erstellen, mit welchem Vorhersagen getroffen werden können (präskriptiv) (Kusiak & Smith 2007, S. 148). Müller & Lenz (2013, S. 80–81) unterscheiden hierbei sechs Data Mining Aufgaben (Abbildung 3-3), für welche wiederum unterschiedliche Data Mining Verfahren eingesetzt werden können.

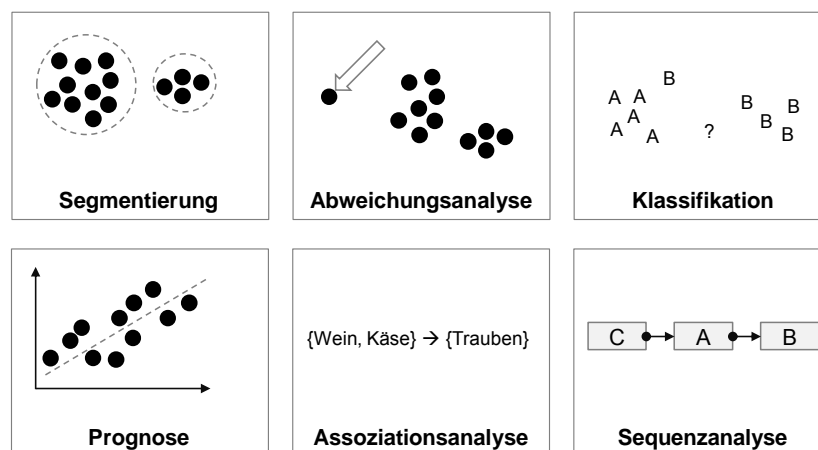


Abbildung 3-3: Data Mining Aufgaben nach Müller & Lenz (2013)

Zur Bewältigung von Data Mining Aufgaben bietet die Literatur eine Vielzahl an Verfahren an, die aus unterschiedlichen Disziplinen stammen. Die Hauptdisziplinen sind Maschinelles Lernen, Pattern Recognition, Statistik und Visualisierung (Braha 2013, S. 9). Die Verfahren sind in Analyse- und Visualisierungsverfahren eingeteilt (Runkler 2010, S. 3), wobei Petersohn (2005) die Analyseverfahren wiederum in Verfahren zur Klassenbildung, Klassifizierung, Assoziation und Zeitreihenanalyse unterteilt. Tabelle 3-3 zeigt eine Übersicht über die Analyse- und Visualisierungsverfahren sowie zugehörige Unterklassen (vgl. Kreuseler & Schumann 2002, S. 11; Petersohn 2005, S. 25–36; Runkler 2010, S. 3).

Tabelle 3-3: Klassifizierung von Data Mining Verfahren

	Beschreibung	Unterklassen
Klassenbildung	Gruppierung ähnlicher Objekte zur Partitionierung von Daten. Partitionen beinhalten Datenobjekte, die untereinander möglichst ähnlich und zu anderen Partitionen möglichst unterschiedlich sind.	Multivariate statistische Verfahren (Clusteranalyse)
		Künstliche neuronale Netze (kompetitives Lernen)
Klassifizierung	Zuordnung von unbekanntem Datenobjekt zu einer „am besten“ passenden Klasse. Gütekriterium wird durch den minimalen Klassifikationsfehler und maximalen Zugehörigkeitsgrad definiert. Der Klassifikator lernt mit Trainingsdaten und nimmt die Zuordnung vor.	Multivariate statistische Verfahren
		Künstliche neuronale Netze (überwachtes Lernen)
		Entscheidungsbaumverfahren
Zeitreihenanalyseverfahren	Analyse von zeitlich geordneten Daten bzw. Daten, deren Reihenfolge eine wesentliche Bedeutung hat. Auswertungsziel stellt eine Prognose, Kontrolle oder Analyse der Daten dar.	Multivariate statistische/ ökonomische Verfahren
		Künstliche neuronale Netze (überwachtes Lernen)
		Entscheidungsbaumverfahren (Regressionsbaumverfahren)
Assoziation	Verfahren zur Identifikation von relevanten Mengen von Relationen zwischen Objekten in Form von Wahrscheinlichkeitsregeln: „wenn X dann wahrscheinlich Y“.	AIS
		Apriori-Klasse
		FP-growth
Visualisierung	Durch Visualisierung können Datenbestände veranschaulicht werden, um die Fähigkeit des Menschen für die Interpretation zu nutzen. Hierbei kann die Visualisierung von Eigenschaften, Struktur oder Werten im Vordergrund stehen.	Elemente von Informationsbeständen
		Strukturierung von Informationsbeständen
		Werte- und Werteverteilung

Data Mining Verfahren werden in den Ingenieurwissenschaften bspw. eingesetzt, um die Produktqualität durch Optimierung von Produktionsprozessen zu verbessern (Da Cunha et al. 2006) oder um Ursachen für Iterationen in Änderungsprozessen zu identifizieren (Elezi et al. 2011). Für weitere Anwendungen in den Ingenieurwissenschaften siehe auch Harding et al. (2006), Kurgan & Musilek (2006), Kusiak (2000), Kusiak & Smith (2007) und Sharafi (2013).

3.2.3 Assoziationsanalyse

Für die vorliegende Problemstellung stellt sich die Assoziationsanalyse, unter den genannten Data Mining Verfahren, als geeignet heraus. Sie ist ein Verfahren zur Identifikation von Abhängigkeiten, ohne dass eine Klassifizierung oder Segmentierung von Daten vorgenommen wird. Die Abhängigkeiten werden in Form von „Wenn-Dann“-Regeln zwischen Ausprägungen von Variablen in einer Datenbank ermittelt und zudem durch unterschiedliche Maßzahlen bewertet. Das Ziel der Assoziationsanalyse ist es, bis dato versteckte Muster in großen Datensätzen zu extrahieren (Nisbet et al. 2009, S. 126).

Die klassische Anwendung dieses Verfahrens ist aus dem Marketing bekannt. Hier wird es zur Analyse von Warenkörben genutzt, um so Abhängigkeiten zwischen Produkten zu extrahieren. Daraufhin können bspw. das Ladenlayout und die Artikelpositionierung verbessert oder Aktionen zum Cross-Marketing geplant werden (Müller & Lenz 2013, S. 89). Außerdem ist es im Onlinehandel möglich, basierend auf dem aktuellen Warenkorb Empfehlungen für weitere interessante Produkte vorzuschlagen, die in der Vergangenheit häufig zusammen gekauft wurden. Diese Anwendung der Assoziationsanalyse ist ein sogenanntes Empfehlungssystem (engl. „Recommender Engine“) (Nisbet et al. 2009, S. 126).

Im Folgenden werden die Grundlagen der Assoziationsregeln, die Suche nach diesen in Datenbanken sowie deren Optimierung und Anwendung näher beschrieben.

Assoziationsregeln

Agrawal et al. (1993, S. 208) entwickelten ein formales Modell für die Assoziationsanalyse. Dieses beinhaltet $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ eine Menge mit n binären Attributen, auch Items genannt, und eine Menge von m Transaktionen T . Jede Transaktion wird durch einen binären Vektor t repräsentiert, mit $t[k] = 1$, wenn t das Item enthält, ansonsten gilt $t[k] = 0$. Alternativ können Transaktionen in einer Datenbank dargestellt werden, wie Tabelle 3-4 beispielhaft für einen Supermarkt zeigt.

Eine Assoziationsregel ist definiert über eine Implikation $X \rightarrow Y$, wobei X und Y eine Teilmenge von I repräsentieren und $X \cap Y = \emptyset$ gilt. X und Y sind Mengen von Items, sogenannte Itemsets, und stellen die Prämisse bzw. Konklusion einer Regel dar. Ein Beispiel für eine solche Regel lautet $\{Milch, Käse\} \rightarrow \{Brot\}$ und verdeutlicht, dass Kunden, die Milch und Käse einkaufen, wahrscheinlich auch Brot einkaufen.

Tabelle 3-4: Beispielhafte Einkäufe (Transaktionen) eines Supermarkts in einer Datenbank

ID	Milch	Brot	Käse	Wein
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	0	1
4	1	1	1	0
5	0	1	1	0

Es ist wichtig herauszustellen, dass Assoziationsregeln nicht unbedingt eine Kausalität implizieren (Müller & Lenz 2013, S. 91). Das Vorhandensein einer starken Regel besagt lediglich, dass zwei Itemsets wahrscheinlich zusammen auftreten, wobei kein unmittelbarer Ursache-

Wirk-Zusammenhang vorliegen muss. Insgesamt können vier Arten von Abhängigkeiten unterschieden werden, die zu einer statistischen Assoziation führen (Müller & Lenz 2013, S. 91):

- Die erste Variable beeinflusst die zweite Variable kausal (direkt oder indirekt).
- Die zweite Variable beeinflusst die erste.
- Die beiden Variablen haben eine gemeinsame Ursache.
- Es ist Zufall, dass eine Assoziation vorliegt.

Suche nach Assoziationsregeln

Um in einer Menge an Transaktionen die interessanten oder relevanten Regeln zu finden, werden die Maßzahlen *Support* und *Konfidenz* verwendet.

Der Support eines Itemsets X , $supp(X)$, ist der relative Anteil an allen Transaktionen, die X enthalten. Der Support einer Regel $supp(X \rightarrow Y)$ entspricht dem relativen Anteil der vereinigten Itemsets X und Y . Damit korrespondiert der Support zur statistischen Signifikanz (Agrawal et al. 1993, S. 208). Am Beispiel der Transaktionen des Supermarkts ergibt sich für das Itemset $\{Milch, Käse\}$ ein Support von $1/5$, da das Itemset in 1 von 5 Transaktionen vorkommt. In 20 % der Einkäufe werden Milch und Käse zusammen eingekauft.

Die Konfidenz einer Regel gibt an, mit welcher relativen Häufigkeit auf eine Prämisse, z. B. $\{Milch, Käse\}$, eine Konklusion, z. B. $\{Brot\}$ eintritt. Definiert ist die Konfidenz einer Regel wie folgt:

$$conf(X \rightarrow Y) = \frac{supp(X \cup Y)}{supp(X)} \quad \text{Formel 3-1}$$

Mit $supp(\{Milch, Käse\} \cup \{Brot\}) = 4/5$ lässt sich für das Beispiel ein Konfidenz von 1 berechnen. Dies bedeutet, dass bei Einkäufen von Milch und Käse immer auch Brot eingekauft wird. Der Konfidenz stellt ein Maß für die Stärke der Regel dar (Agrawal et al. 1993, S. 208).

Der generelle Ablauf der Assoziationsanalyse erfolgt in zwei Schritten (Agrawal et al. 1993, S. 208):

- Suche nach Itemsets, deren Support über einem definierten Schwellenwert (minimaler Support) liegt, um sogenannte häufige Itemsets in der Datenbank zu ermitteln. Zusätzlich können syntaktische Bedingungen berücksichtigt werden, bspw. wenn nur ein bestimmtes Item betreffende Regeln von Interesse sind.
- Basierend auf den häufigen Itemsets werden anschließend Regeln generiert. Es gilt hierbei, dass jede Teilmenge eines häufigen Itemsets wiederum häufig ist. Als starke Regeln gelten jene, die neben einem minimalen Support einen minimalen Konfidenzwert überschreiten.

Die Algorithmen zur Ermittlung der Assoziationsregeln unterscheiden sich, indem diese entweder parallel oder sequentiell nach Itemsets suchen. Dies hat Auswirkungen auf Rechen- und Speicherkapazitäten. Für eine Beschreibung verschiedener Algorithmen sei auf Petersohn (2005, S. 103) verwiesen.

Eine weitere Maßzahl, um die Interessanztheit einer Regel zu bewerten, ist der Lift. Dieser kommt insbesondere dann zum Einsatz, wenn viele Regeln gefunden werden, da mit Hilfe des Lifts die Regeln mit dem höchsten partiellen Informationsgewinn ermittelt werden können

(Müller & Lenz 2013, S. 91). Hierzu wird das Verhältnis zwischen beobachtbarem Konfidenz einer Regel $X \rightarrow Y$ mit dem erwarteten Auftreten von Y ermittelt:

$$\text{lift}(X \rightarrow Y) = \frac{\text{conf}(X \rightarrow Y)}{\text{supp}(Y)} = \frac{\text{supp}(X \cup Y)}{\text{supp}(X) \text{supp}(Y)} \quad \text{Formel 3-2}$$

Ist der Lift > 1 liegt eine positive Korrelation vor, d. h. dass Y in Itemsets mit X häufiger auftritt als in Itemsets mit anderen Items. Ist der Lift 1 liegt keine Korrelation vor; ist der Lift hingegen < 1 wird von einer negativen Korrelation ausgegangen.

Für die beispielhafte Regel des Supermarkts $\{\text{Milch, Käse}\} \rightarrow \{\text{Brot}\}$ ergibt sich ein Lift von 1,25, was verdeutlicht, dass eine positive Korrelation vorliegt. Dieser Wert kann folgendermaßen interpretiert werden: Brot tritt in Itemsets, die Milch und Käse enthalten, 0,25-mal häufiger auf als in anderen Itemsets.

Anwendung und Optimierung von Assoziationsregeln

Die Maßzahlen für die Regelgenerierung können optimiert werden indem Regeln anhand realer Transaktionen oder Daten getestet werden. Für diese muss der tatsächliche Zusammenhang zwischen einer Prämisse und Konklusion zumindest im Nachhinein bekannt sein. Es können vier unterschiedliche Fälle²¹ bei der Regelanwendung eintreten (Jain & Kabra 2012, S. 283):

1. **True positive (tp):** Eine Prämisse X liegt vor und die Konklusion Y tritt ein.
2. **False negative (fn):** Eine Prämisse X liegt nicht vor und die Konklusion Y tritt ein.
3. **False positive (fp):** Eine Prämisse X liegt vor und die Konklusion Y tritt nicht ein.
4. **True negative (tn):** Eine Prämisse X liegt nicht vor und die Konklusion Y tritt nicht ein.

In den Fällen eins und vier ist die Vorhersage richtig, in den Fällen zwei und drei findet eine fehlerhafte Vorhersage statt.

Für alle Transaktionen oder Daten wird die Regelanwendung getestet und hinsichtlich der vier Möglichkeiten bewertet. Daraufhin werden die Häufigkeiten der Fälle in einer sogenannten Konfusionsmatrix dargestellt (s. Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5: Konfusionsmatrix für die Regelbewertung

	Konklusion tritt ein	Konklusion tritt nicht ein
Prämisse liegt vor (tp + fp)	tp	fp
Prämisse liegt nicht vor (fn + tn)	fn	tn

Eine Regel ist umso besser, je höher die Werte für tp und tn sind und je niedriger die Werte für fp und fn (Jain & Kabra 2012, S. 284). Durch eine systematische Variation können die minimalen Support- und Konfidenzwerte identifiziert werden, für welche die Regeln die besten Vorhersagen treffen.

²¹ Tlw. werden die vier Fälle auch ins Deutsche übersetzt: richtig positiv, falsch negativ, falsch positiv und richtig negativ.

3.3 Zwischenfazit

Das dritte Kapitel umfasst die Darstellung und Auswahl der methodischen Grundlagen für die vorliegende Dissertation. Diese Grundlagen dienen der Modellierung von Änderungszusammenhängen zur Bestimmung von Änderungsausbreitungen in Produktstrukturen sowie der Identifikation von Änderungsausbreitungen in großen Änderungsdatenmengen.

Auf Seiten der Modellierung von Strukturen eignen sich insbesondere DSMs aus dem Bereich des strukturellen Komplexitätsmanagement, Graphen und Netzwerke. Die genannten Modellierungsmethoden resultieren aus unterschiedlichen Disziplinen, lassen sich aber letztendlich alle in Form von Matrizen repräsentieren und dadurch ineinander überführen. Für die Anwendung von DSMs spricht die weite Verbreitung dieser Methode in der Produktentwicklung, z. B. zur Darstellung von Produkt-, Prozess- oder Organisationsstrukturen (vgl. Kapitel 3.1.1). Bestehende Ansätze zur Änderungsausbreitung basieren überwiegend auf DSMs (vgl. Kapitel 2.4), so dass durch eine entsprechende Modellierung eine Kompatibilität von Modellen und Analysen erzielt wird.

Zur Identifikation von Strukturen in großen Datenbeständen eignen sich Verfahren des Data Minings, die allgemein Aufgaben der Segmentierung, Klassifikation, Prognose, Abweichungs-, Sequenz- oder Assoziationsanalyse erfüllen. Für diese Arbeit ist insbesondere die Assoziationsanalyse von Interesse, da diese automatisch Relationen zwischen Objekten in Form von Wahrscheinlichkeitsregeln ermittelt („wenn X dann wahrscheinlich Y“). Die Methode beruht auf den Maßzahlen Support, Konfidenz und Lift, wodurch zusätzlich zur Wahrscheinlichkeit auch die Häufigkeit und Bedeutung von Zusammenhängen berücksichtigt wird. Bekannt ist die Anwendung der Assoziationsanalyse v. a. aus der Warenkorbanalyse von Onlinehändlern, die Zusammenhänge zwischen häufig gemeinsam gekauften Produkten ermittelt und zu Marketingzwecken einsetzt. Für den Gesamtprozess der Musterentdeckung wird der KDD-Prozess von Fayyad et al. (1996b) ausgewählt, der neben dem eigentlichen Data Mining auch vorbereitende Schritte sowie die Bewertung der Resultate einschließt. Dieser umfasst alle wesentlichen Schritte, ist vollständig und der vergleichsweise detaillierteste KDD-Prozess. Er ist zudem in Wissenschaft und Industrie am weitesten verbreitet.

4. Anforderungen an den Ansatz

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik zur datenbasierten Identifikation und Analyse von Änderungsausbreitungen in der Produktstruktur abgeleitet. Zunächst wird das hierfür gewählte Vorgehen zur Anforderungsermittlung beschrieben, das sich an dem Vorgehen zur Anforderungsermittlung in der Produktentwicklung orientiert. Abschließend werden die daraus resultierenden Anforderungen an die Methodik dargestellt.

4.1 Vorgehen zur Anforderungsermittlung

Basierend auf der Anforderungsermittlung in der Produktentwicklung setzt das gewählte Vorgehen zunächst eine Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung voraus (Feldhusen et al. 2012c, S. 321), wie diese im einleitenden Kapitel 1 und durch Betrachtung der Grundlagen in Kapitel 2 erfolgte. Die Anforderungen an den Ansatz resultieren letztlich aus drei unterschiedlichen Arten an Informationsquellen:

- **Literatur:** Analyse bestehender ähnlicher Lösungsansätze und zugrundeliegender Anforderungen (literaturbasierte Erhebung).
- **Industriearbeitskreis Änderungsmanagement:** Anforderungen werden mit den Teilnehmern des Arbeitskreises in Workshops erhoben. Diese resultieren insbesondere aus den Terminen drei und fünf zu Änderungsprozessen bzw. Tools im Änderungsmanagement (vgl. Tabelle 10-1 im Anhang).
- **Interviews:** Mit ausgewählten Teilnehmern des Arbeitskreises werden detailliertere Interviews durchgeführt.

Insbesondere letztere Quellen sind wichtig, um die Anforderungen der potentiellen Nutzergruppe zu erheben und eine Anwendbarkeit der Methode in der Praxis sicherzustellen. Im Verlauf der Anforderungsklä rung werden zunächst Anforderungen über eine Literaturrecherche, zu Anforderungen an bestehenden ähnlichen Lösungsansätzen, ermittelt. Diese werden ergänzt um Anforderungen, die in Workshops des Industriearbeitskreises Änderungsmanagement erhoben werden. In anschließenden Interviews mit Industrievertretern werden die teilweise unspezifischen Anforderungen stufenweise präzisiert (vgl. Detaillierungsmethode nach Kramer & Kramer 1997, S. 86). Nachfolgend werden die resultierenden Anforderungen dargestellt.

4.2 Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik

In Anlehnung an Hamraz et al. (2013b, S. 771–772), der einen Benchmark zu bestehenden Ansätzen der Änderungsmodellierung durchgeführt hat, erfolgt die Kategorisierung der Anforderungen an die Methodik. Diese berücksichtigt Anforderungen an das zugrundeliegende Modell und dessen Modellierung, Anforderungen an Eingangsgrößen des Modells sowie anwendungs- und ergebnisorientierte Anforderungen (vgl. Abbildung 4-1).

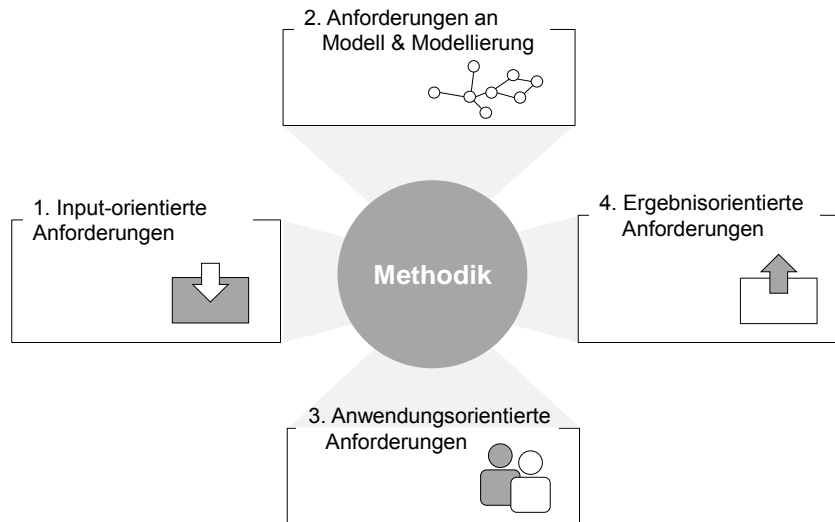


Abbildung 4-1: Anforderungskategorien für die Methodik

Die Input-orientierten Anforderungen resultieren teilweise aus der Zielsetzung der Methodik, die insbesondere verfügbare Änderungs- und Produktdaten fokussiert, sowie aus der literaturbasierten Anforderungsrecherche zu ähnlichen Ansätzen. Die Anforderungen an das Modell und dessen Modellierung stammen ebenfalls aus diesen Quellen. Die anwendungs- und ergebnisorientierten Anforderungen, die die spätere Anwendbarkeit der Methodik in der industriellen Praxis sicherstellen, wurden überwiegend in den Workshops und Interviews mit Unternehmensvertretern gewonnen.

Tabelle 4-1 zeigt die ermittelten Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik, entsprechend der eingeführten Kategorisierung, und deren zugrundeliegenden Anforderungsquellen.

Tabelle 4-1: Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik und zugehörige Anforderungsquellen

Kategorie	Anforderung	Beschreibung	Lit	IAK	Int
1. Input-orientierte Anforderungen	Breites Produktspektrum	Verwendung für ein breites Produktspektrum (wenig bis sehr komplexe Produkte).	x	x	
	Verschiedene Änderungsarten	Differenzierung zwischen verschiedenen Änderungsarten (z. B. bei unterschiedlicher Ursache).	x	x	
	Verschiedene Granularitätslevel	Berücksichtigung verschiedener Granularitätslevel der Produktstruktur (z. B. System, Baugruppe und Einzelteil).	x	x	
	Verwendung verfügbarer Daten & Informationen	Verfügbare Daten und Informationen aus existierenden Datenbanken (z. B. Änderungsdaten).		x	x

Kategorie	Anforderung	Beschreibung	Lit	IAK	Int
2. Anforderungen an Modell & Modellierung	Produktmodellierung	Modellierung des Produkts oder dessen Dekomposition.	x		
	Änderungsausbreitung	Modellierung von Abhängigkeiten die eine Änderungsausbreitung bedingen.	x	x	x
	Änderungsmodellierung	Modellierung unterschiedlicher Arten von Abhängigkeiten und Änderungseigenschaften.	x		
	Genauigkeit	Modell beinhaltet alle relevanten Relationen.	x	x	x
	Konsistenz	Modell ist konsistent sowie konsistent gegenüber anderen Modellen.	x		
	Kompatibilität	Modell ist kompatibel zu/mit anderen bestehenden Methoden und Tools.	x		
3. Anwendungsorientierte Anforderungen	Einfache Anwendung/Automatisierung	Modellierung und Analyse sind unter Bereitstellung einer Anleitung einfach durchzuführen.	x	x	x
	Verfügbarkeit benötigter Software	Benötigte Software ist frei verfügbar und leicht zu implementieren.		x	x
	Industrielle Anwendbarkeit	Methodik ist anwendbar für reale Problemstellungen und effektiv nutzbar.	x	x	x
	Flexibilität	Anpassungen an der Methodik sowie dem zugrundeliegenden Modell sind einfach möglich.		x	x
4. Ergebnisorientierte Anforderungen	Nutzbarkeit der Ergebnisse	Ergebnisse sind in ähnlichen Produktentwicklungsprojekten wiederverwendbar.		x	x
	Quantität der Ergebnisse	Verschiedene Analysen mit quantitativen Ergebnissen.	x	x	x
	Qualität der Ergebnisse	Ergebnisse sind nachvollziehbar, korrekt und für die Anwendung hinreichend genau.	x	x	x

Legende: Lit – Literatur, IAK – Industriearbeitskreis, Int - Interviews

Die erhobene Anforderungsliste wird in dieser Arbeit angewandt um bestehende Ansätze aus dem Stand der Forschung und Technik hinsichtlich ihrer Anforderungserfüllung zu bewerten (s. Kapitel 5.3) und um im Rahmen der Entwicklung und Evaluation die entwickelte Methodik hinsichtlich der Anforderungserfüllung abzusichern (s. Kapitel 7.6).

5. Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel bereitet den relevanten Stand der Forschung und Technik auf und diskutiert existierende Ansätze zum Umgang mit den in Kapitel 1.2 genannten Herausforderungen. Es werden insbesondere datenbasierte Ansätze zur a priori und a posteriori Analyse betrachtet, um die zunehmenden Produkt- und Prozesskomplexität in Unternehmen bei der Abschätzung der Änderungsauswirkungen zu berücksichtigen. Diese haben gegenüber interviewbasierten Methoden den Vorteil, dass diese semi-automatisch erhoben werden und dadurch weniger Aufwand erfordern. Die wissenschaftlichen Ansätze werden schließlich hinsichtlich der Anforderungserfüllung bewertet und ein zusammenfassendes Fazit zum handlungsleitenden Forschungsbedarf erarbeitet.

5.1 A priori Analyse der Änderungsausbreitung

Die Abschätzung der Änderungsausbreitung stellt insbesondere bei Änderungen an komplexen technischen Produkten eine zentrale Aktivität im Änderungsmanagement dar (vgl. Kapitel 2.4.1). Diese Änderungsausbreitungen werden durch Abhängigkeiten zwischen Bauteilen hervorgerufen, die selten vollständig vermieden werden können (Eckert et al. 2004, S. 1). Zum Umgang mit und der Vorhersage der Änderungsausbreitung werden häufig modellbasierte Ansätze verwendet, die auf Struktur- oder Netzwerkmodellen zur Darstellung der Abhängigkeiten innerhalb eines technischen Produkts basieren. Für die vorliegende Arbeit sind Ansätze relevant, die auf einer datenbasierten Erstellung dieser Struktur- und Netzwerkmodelle aufbauen.

Die Auswahl der relevanten Ansätze der a priori Analyse für den Stand der Forschung und Technik werden in Kapitel 5.1.1 erläutert. Die Beschreibung der relevanten Ansätze erfolgt in Kapitel 5.1.2 und stellt damit das erforderliche Verständnis für die Gegenüberstellung der Ansätze in Kapitel 5.3 bereit.

5.1.1 Auswahl relevanter Ansätze zur a priori Analyse

Die Auswahl relevanter Ansätze für die datenbasierte a priori Analyse ist das Ergebnis einer systematischen Literaturstudie zu Methoden zur Auswirkungsabschätzung von Änderungen auf die Produktstruktur. Die Recherche nach Webster & Watson (2002) fokussierte Journal-, Konferenz- und Buchbeiträgen aus den Bereichen der Ingenieurwissenschaften unter Anwendung von deutschen und englischen Suchwörtern. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Literaturstudie baut auf bestehenden Studien auf. Daraus hervorzuheben ist insbesondere die von Hamraz et al. (2013a) am „Engineering Design Centre (EDC)“ in Cambridge durchgeführte Studie. Diese berücksichtigt Publikationen bis zum Jahre 2011 sowie frühere Studien (vgl. Ahmed-Kristensen et al. 2011; Jarratt et al. 2011; Rouibah & Caskey 2003; Wright 1997). Mit in Summe 400 Publikationen sowie 54 Methoden zum Änderungsmanagement ist sie eine der umfangreichsten und neuesten Literaturstudien zu diesem Themenbereich.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurden 21 Methoden identifiziert, die zur Abschätzung von Änderungsausbreitungen in der Produktstruktur verwendet werden. In einer anschließenden Literaturrecherche mit dem Schwerpunkt auf die Jahre 2012 bis 2015 wurden weitere 13 Methoden in diesem Themenbereich identifiziert. Die stichwortbasierte Recherche fokussierte hierbei etablierte Literaturdatenbanken und eine Auswahl an Suchbegriffen (s. Anhang, Tabelle 10-2). Die aus der Literaturstudie insgesamt hervorgegangenen 34 Ansätze sind in Tabelle 10-2 im Anhang aufgelistet und mit einer kurzen Beschreibung versehen. Zusätzlich sind diese entsprechend der Informationsakquise klassifiziert: Interviewbasiert, datenbasiert oder andere/nicht genannt. Für diese Arbeit werden demnach die Ansätze als relevant erachtet, die als Informationsbasis vergangene Änderungsdaten nutzen.

5.1.2 Relevante Ansätze zur a priori Analyse

Die ausgewählten Ansätze zur datenbasierten a priori Analyse werden mit Fokus auf die verwendeten Daten, das angewandte Analyseverfahren und resultierende Analyseergebnisse diskutiert. Hierbei wird die Heterogenität der verfügbaren Ansätze deutlich, die bspw. aus der Nutzung unterschiedlicher Daten resultiert.

Kocar & Akgunduz (2010)

In ihrer Publikation stellen Kocar & Akgunduz (2010) das rechnergestützte Änderungsmanagement ADVICE vor, das auf eine einheitliche Änderungsdatenstruktur aufbaut. ADVICE wird einerseits zur systematischen Speicherung und Nachverfolgung aller änderungsbezogenen Daten verwendet. Andererseits werden zusätzlich weitere im Unternehmen verfügbare Datenquellen wie ERP Systeme und die Stückliste integriert, um weitere produktbezogene Daten zu erhalten.

ADVICE unterstützt typische Entscheidungssituationen in Änderungsprozessen, indem aus der Datenbasis generierte Vorschläge unterbreitet werden. Der Ansatz adressiert vor allem die Priorisierung von Änderungen sowie die Vorhersage der Änderungsausbreitung, die durch Änderungen verursacht werden können. Die Änderungsausbreitung wird mit Hilfe von Data Mining Verfahren und dem a priori Algorithmus zur Sequenzanalyse berechnet. In den Änderungsdaten werden sequenzielle Muster in dieser Form gesucht: wenn {Änderung an Baugruppe A} vorkommt, dann wird wahrscheinlich eine {Änderung an Baugruppe B} innerhalb von vier Wochen auftreten. Das Resultat sind zeitliche Änderungsmuster, die mit einer bestimmten Häufigkeit innerhalb der Datenbasis auftreten und zudem eine statistische Relevanz haben.

Das Änderungsmanagement-System ADVICE sieht vor, dem Änderungskoordinator oder -manager im Änderungsprozess automatisch Vorschläge zu unterbreiten, wenn die Folgen einer Änderung bewerten werden müssen.

Morkos et al. (2012)

Die Publikation adressiert Änderungen von Anforderungen und untersucht daraus resultierende Änderungsausbreitungen. Insbesondere in großen Projekten mit vielen Entwicklern und Ingenieuren, die die Entwicklung eines komplexen Systems zum Ziel haben, soll diese Methode durch eine Vorhersage der Änderungsausbreitung unterstützen.

Unternehmen dokumentieren Änderungen von Anforderungen teilweise wie normale Produktänderungen, da diese beispielsweise der Nachvollziehbarkeit der Kommunikation mit dem Kunden dienen. Dadurch werden diese analog zu Produktänderungen in Datenmanagement-Systemen gespeichert.

Im Ansatz von Morkos et al. (2012) werden zunächst Abhängigkeiten zwischen Anforderungen abgeleitet und in eine DSM überführt, indem entweder Anforderungen die dasselbe Objekt betreffen oder die gleiche Schlüsselwörter in der Anforderungsformulierung verwenden als miteinander verbunden gelten. Für eine Formulierung können fünf definierte Schlüsselwörter ausgewählt werden, über die dann eine Verbindung zu weiteren Anforderungen möglich ist.

Anschließend werden aus dieser ursprünglichen DSM sogenannte Δ DSMs abgeleitet, indem, ausgehend von einer Anforderungsänderung, die in zweiter und dritter Ordnung betroffenen Anforderungen ermittelt werden. Die erste Ordnung ergibt sich aus den direkten Relationen zwischen Anforderungen, bspw. wenn sie das gleiche Objekt betreffen. Eine Relation zweiter Ordnung liegt vor, wenn Anforderung A mit Anforderung B und Anforderung B mit Anforderung C direkt verbunden ist. In diesem Fall ist Anforderung A indirekt mit Anforderung C über eine Relation zweiter Ordnung verbunden.

Für die Evaluation des Ansatzes werden die ermittelten Δ DSMs mit realen Änderungen abgeglichen, indem ausgehend von einer auftretenden Anforderungsänderung später auftretende Änderungen an Anforderungen erster und zweiter Ordnung identifiziert werden. Durch die Verwendung der Δ DSMs können bereits frühzeitig Änderungsausbreitungen identifiziert und möglicherweise vermieden werden.

Hamraz et al. (2013c)

Die Publikation stellt eine Kombination der CPM²² mit der Interface Control Method (ICM) dar mit dem Ziel, bestehende Einschränkungen der CPM zu überwinden. Diese resultieren laut den Autoren u. a. aus der expertenbasierten Erhebung von Abhängigkeiten und den daraus resultierenden subjektiven Daten zur Erstellung der zugrundeliegenden Abhängigkeitsmatrix sowie der fehlenden Differenzierung zwischen Änderungsabhängigkeiten.

Die ursprünglich in Interviews oder Workshops durch Schätzung erhobenen Inputwerte für die CPM²³ werden in dem Ansatz von Hamraz et al. (2013c) durch Schnittstellendaten aus der ICM substituiert. Die ICM beschreibt Schnittstellen zwischen Subsystemen in Form von Regeln, die

²² CPM steht für „Change Prediction Method“ und ist eine der am häufigsten zitierten Methoden zur Änderungsausbreitung (Hamraz et al. 2013a, S. 488).

²³ Die CPM benötigt Wahrscheinlichkeiten von Änderungsausbreitungen sowie die Höhe der Änderungsauswirkung als Input.

sich stets auf zwei Ports beziehen. Die Ports beschreiben Aspekte eines Subsystems und sind definiert über verschiedene Attribute (Parameter), die verschiedenen Dimensionen (bspw. geometrisch oder energetisch) angehören. Die Ports korrespondieren zu Bauteilen und die Regeln daher zu Abhängigkeiten zwischen diesen. Die Regeln für die Ports (z. B. p_1 und q_5) werden in Ungleichungen (z. B. $q_5 \leq p_1 \leq 2q_5$) und gelegentlich in Gleichungen (z. B. $p_1 = 2q_5$) formuliert. Hamraz et al. (2013c) entwickeln ein Berechnungsverfahren, mit welchem aus den ICM Regeln, den Vorgaben und Anforderungen, die Änderungswahrscheinlichkeit zwischen Ports sowie die Auswirkungen einer Änderung berechnet werden kann. Der Ansatz bietet einen guten Ansatzpunkt für die a priori Analyse von Änderungen, falls ein Unternehmen die ICM nutzt und über relevante Schnittstellendaten für zu entwickelnde Systeme verfügt. Andernfalls bleibt der Nachteil der CPM bestehen, da Schnittstellendaten, die Änderungsabhängigkeiten beschreiben, expertenbasiert erhoben werden müssen.

5.2 A posteriori Analyse der Änderungsausbreitung

Die a posteriori Analyse von Änderungsauswirkungen ist ein relativ junges Forschungsgebiet, das sich zum Ziel gesetzt hat, Erkenntnisse aus vergangenen Änderungen zu gewinnen und damit zukünftige Entwicklungsprojekte zu verbessern. Hierbei werden Verbesserungen hinsichtlich der Produktarchitektur, des Umgangs mit Änderungen und des Produktentwicklungsprozesses angestrebt. Die verwendeten Analysemethoden lassen sich in statistische und strukturelle Auswertungsmethoden unterscheiden (vgl. Kapitel 2.4.2). Für die vorliegende Arbeit sind die strukturellen Analysen relevant, da diese die Änderungsausbreitung innerhalb von Produktstrukturen adressieren.

Die Auswahl relevanter Ansätze der a posteriori Analyse für den Stand der Forschung und Technik wird in Kapitel 5.2.1 erläutert. In Kapitel 5.2.2 erfolgt die Beschreibung der relevanten Ansätze, wodurch das erforderliche Verständnis für deren Gegenüberstellung in Kapitel 5.3 bereitgestellt wird.

5.2.1 Auswahl relevanter Ansätze zur a posteriori Analyse

Die Auswahl relevanter Ansätze für die a posteriori Analyse ist ebenfalls Ergebnis einer systematischen Literaturstudie, die sich aus einer initialen stichwortbasierten und einer erweiterten publikationsbasierten Recherche ergeben.

Die stichwortbasierte Recherche orientierte sich wiederum an Webster & Watson (2002) und konzentrierte sich auf Journal-, Konferenz und Buchbeiträgen aus den Bereichen der Ingenieurwissenschaften mit ausgewählten Suchwörtern in Deutsch und Englisch. In der publikationsbasierten Recherche wurden Ansätze zur a posteriori Analyse von Änderungsauswirkungen durch eine Vorwärts- und Rückwärtssuche aus der stichwortbasierten Recherche erweitert. Diese umfassen die Betrachtung des Literaturverzeichnisses der Publikationen (rückwärts) und der Referenz auf die genannte Publikation (vorwärts).

Die aus der Literaturstudie hervorgegangenen 11 Ansätze zur a posteriori Analyse von Änderungsausbreitungen sind in Tabelle 10-3 im Anhang aufgelistet und hinsichtlich ihrer Analyseart klassifiziert. Darüber hinaus sind jeweils eine kurze Beschreibung des Umfangs und des

Ziels der Analyse ergänzt. Lagen mehrere Publikationen zu einer Methode vor, wurde nur die Hauptpublikation angeführt. Für diese Arbeit werden Ansätze als relevant erachtet, sofern diese Strukturen und Abhängigkeiten in großen Datenmengen identifizieren oder zumindest dafür geeignet sind. Dies trifft auf vier der Ansätze zu, die im Folgenden näher beschrieben werden.

5.2.2 Relevante Ansätze zur a posteriori Analyse

Die ausgewählten Ansätze zur datenbasierten a posteriori Analyse werden nachfolgend mit einem Fokus auf verwendete Daten, Analyseverfahren und resultierende Analyseergebnisse beschrieben.

Giffin et al. (2009)

In ihrer Publikation analysieren Giffin et al. (2009) über 41.500 Änderungsanträge, die innerhalb eines komplexen Entwicklungsprojekts eines Sensors entstanden. Der Änderungsantrag des Sensorherstellers beinhaltet u. a. eine eindeutige ID, den aktuellen Status der Änderung, die betroffenen Subsysteme sowie relationale Änderungen. Relationen liegen vor wenn Änderung aus bereits vorhandenen Änderungen hervorgehen; sie haben dann die Relation „Kind von“. Sind Änderungen auf eine gleiche Änderung zurückzuführen, haben sie die Relation „Geschwister“. Aus diesen Informationen wird ein Netzwerk aus Eltern-, Kinder- und Geschwister-Änderungen für 46 betroffene Subsysteme des Sensors entwickelt. Ergebnis ist eine Häufigkeitsmatrix, die Änderungshäufigkeiten innerhalb des Systems und zwischen Subsystemen darstellt. Weiterhin werden sogenannte Motifs im Änderungsnetzwerk identifiziert, die aus einer bis drei Änderungen, deren Verwandtschaftsverhältnis und Status bestehen (z. B. umgesetzt oder abgelehnt). Durch diese grundlegenden Motifs setzt sich das gesamte Änderungsnetzwerk zusammen, wobei einige Motifs häufiger auftreten als andere.

Zur Bewertung des Änderungsverhaltens von Subsystemen werden drei wesentliche Kennwerte²⁴ entwickelt und vorgestellt: (1) Änderungsabsorber Index, (2) Änderungsreflektor Index und (3) Änderungsausbreitung Index. Die Änderungsabsorber und -reflektor Indizes geben das Verhältnis von abgelehnten bzw. durchgeführten Änderungen zu allen beantragten Änderungen an. Der Änderungsausbreitung Index ist ein normierter Kennwert zwischen -1 und +1, der unter Verwendung der Graphentheorie berechnet wird. Er stellt die Differenz zwischen ausgehenden und eingehenden Änderungsrelationen eines Subsystems dar und wird durch die Summe aller Relationen des Knotens normiert. Der Ausbreitungsindex repräsentiert die relative Stärke eines Netzwerkbereichs als *Multiplikator*, wenn von diesem bedeutend mehr Änderungen ausgehen als eingehen, als *Absorber*, wenn dieser bedeutend mehr eingehende als ausgehende Änderungen aufweist, und als *Träger*, wenn das Verhältnis zwischen eingehenden und ausgehenden Änderungen relativ ausgeglichen ist. Subsysteme, die als Multiplikatoren im Netzwerk agieren, sollten vom Änderungsmanagement besonders adressiert werden.

Ziel der a posteriori Analyse ist laut der Autoren, ein besseres Verständnis über Änderungen und deren Ausbreitung in Systemen zu generieren sowie eine Nutzung der Erkenntnisse in

²⁴ Im Englischen werden diese als CAI (Change Acceptance Index), CRI (Change Reflection Index) und CPI (Change Propagation Index) angeführt.

neuen und ähnlich großen Entwicklungsprojekten. Eine nähere Beschreibung, für welche Tätigkeiten oder Personen die erzeugten Erkenntnisse einen Mehrwert bieten und welchen Effekt dies in neuen Entwicklungsprojekten haben könnte, wird nicht angeführt.

Pasqual & de Weck (2012)

Die Publikation fokussiert Änderungsausbreitungen auf verschiedenen Ebenen und baut auf dem gleichen Änderungsdatensatz wie die Publikation von Giffin et al. (2009) auf. Im Verständnis von Pasqual & de Weck (2012) breiten sich Änderungen auf unterschiedlichen Ebenen aus: der Produktebene, der Sozialebene (bestehend aus Entwicklern) sowie der Änderungsebene. In einem Netzwerkmodell werden Relationen innerhalb und zwischen den genannten Schichten erfasst. Zur Analyse des Netzwerks stellen Pasqual & de Weck (2012) eine Sammlung bestehender Analysetools und Metriken²⁵ aus der Literatur bereit. Darüber hinaus werden für die Sozialebene in Anlehnung an bestehende Metriken der Produktebene zwei neue Metriken entwickelt. (1) Der Entwickler Änderungsausbreitung Index gibt in einem normierten Kennwert zwischen -1 und +1 an, inwiefern Änderungen bei ihm absorbiert werden oder zu weiteren Änderungen führen. (2) Die Annahmerate für Änderungsanträge zeigt für einen Entwickler, wie viele der eingereichten Änderungsanträge genehmigt und umgesetzt werden. Im Ausblick wird die mögliche Nutzung der Erkenntnisse in Form von Heuristiken in neuen Entwicklungsprojekten genannt, da ähnliche Entwicklungsprojekte auch ein ähnliches Verhalten aufweisen könnten. Abgesehen davon bleibt jedoch offen, wie die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Netzwerkmodell mit den drei Ebenen (Sozial-, Produkt- und Änderungsebene) in Unternehmen angewandt und welche Verbesserungen erzielt werden könnten.

Sharafi (2013)

Die Dissertation von Sharafi (2013) behandelt den Einsatz von KDD im Änderungsmanagement und untersucht über 53.000 Änderungsanträge eines Automobilherstellers. Die Änderungsdaten umfassen die eigentlichen Änderungsdaten (bspw. Änderungsnummer, Ursache) und zugehörige Änderungsprozessdaten, wie bspw. Durchlaufzeiten der Änderung oder involvierte Personen. Die Änderungen entstanden innerhalb eines Zeitintervalls von fünfeinhalb Jahren und gehören unterschiedlichen Entwicklungsprojekten und Baureihen an.

In der Analyse verwendet Sharafi (2013) statistische und strukturelle Verfahren, um verschiedene Fragestellungen des Änderungsmanagements zu beantworten. Nachfolgend sind drei verwendete Verfahren mit Fragestellung exemplarisch aufgeführt (Sharafi 2013, S. 159):

- **Statistische Verfahren**

„Wie verteilen sich Änderungsanträge eines Entwicklungsprojekts im Zeitverlauf über die gesamte Entwicklungszeit?“

- **Text-Mining**

„Gibt es Ähnlichkeiten zwischen den Problembeschreibungen der Änderungsanträge?“

²⁵ Im Englischen werden diese als Engineer-CPI (Engineer Change Propagation Index) und PD (Propagation Directness) bezeichnet.

- **Assoziationsanalyse**

„Gibt es Module, die relativ häufig gemeinsam Bestandteil eines Änderungsantrags sind?“

Für die vorliegende Dissertation ist insbesondere die Assoziationsanalyse relevant, da diese zur Entdeckung von Beziehungen genutzt wird. Sharafi (2013) verwendet für die Assoziationsanalyse alle Änderungen eines Unternehmens, die Module involvieren, unabhängig von deren Zugehörigkeit zu bestimmten Entwicklungsprojekten, Fahrzeugreihen oder zugrundeliegenden Ursachen. Als mögliche Implikationen aus der Assoziationsanalyse führt Sharafi (2013) an, Module mit starken Abhängigkeiten in der Entwicklung bereits besser aufeinander abzustimmen, Änderungsanträge gemeinsam von betroffenen Entwicklungsabteilungen der Module zu erstellen und zu bearbeiten sowie die Zusammenhänge als Empfehlungen in neuen Erstellungsprozessen zu verwenden.

In diesem Ansatz werden sämtliche KDD-Methoden auf die gesamten Änderungen eines Automobilherstellers angewandt. Da nicht hinsichtlich Fahrzeugprojekten oder bestimmten Entwicklungsabschnitten differenziert wird, bleiben die Ergebnisse relativ unspezifisch und generell. Die Anwendbarkeit und das Potenzial von KDD im Änderungsmanagement werden ersichtlich, die konkrete Anwendung für spezifische Problemstellungen und der daraus resultierende Mehrwert für das Änderungsmanagement bleiben hingegen unberücksichtigt.

5.3 Gegenüberstellung der Ansätze zur Änderungsanalyse

In diesem Kapitel findet eine Gegenüberstellung der Ansätze aus dem Stand der Forschung und Technik anhand der erhobenen Anforderungen (vgl. Kapitel 4.2) statt. Tabelle 5-1 zeigt hierzu die Ansätze, die in Bezug auf ihre Anforderungserfüllung bewertet wurden. Die Begründung zur Einordnung der Ansätze ist im Anhang dargelegt (s. Tabelle 10-4 bis Tabelle 10-9). Auf dieser Basis wird anschließend der Forschungsbedarf konkretisiert.

Tabelle 5-1: Vergleich der relevanten Ansätze anhand der erhobenen Anforderungen

Kategorie	Nr. Anforderung	A priori		A posteriori			
		Kocar & Akgunduz (2010)	Morkos et al. (2012)	Hamraz et al. (2013c)	Giffin et al. (2009)	Pasqual & de Weck (2012)	Sharafi (2013)
Input-orientierte Anforderungen	1.1 Breites Produktspektrum	●	●	○	●	●	●
	1.2 Verschiedene Änderungsarten	●	○	●	○	○	○
	1.3 Verschiedene Granularitätslevel	○	○	○	○	○	○
	1.4 Verwendung verfügbarer Daten & Informationen	◐	●	◐	●	◐	●
Anforderungen an Modell/Modellierung	2.1 Produktmodellierung	○	○	○	○	○	○
	2.2 Änderungsausbreitung	○	◐	●	●	●	●
	2.3 Änderungsmodellierung	○	○	●	○	○	○
	2.4 Genauigkeit	●	○	◐	●	●	●
	2.5 Konsistenz	●	○	●	●	●	●
	2.6 Kompatibilität	○	○	●	◐	◐	○
Anwendungsorientierte Anforderungen	3.1 Einfache Anwendung/Automatisierung	●	◐	●	◐	◐	●
	3.2 Verfügbarkeit benötigter Software	○	●	◐	●	●	●
	3.3 Industrielle Anwendbarkeit	◐	○	-	○	○	●
	3.4 Flexibilität	●	○	○	○	○	○
Ergebnisorientiert Anforderungen	4.1 Nutzbarkeit der Ergebnisse	●	○	●	●	●	●
	4.2 Quantität der Ergebnisse	◐	○	●	●	●	○
	4.3 Qualität der Ergebnisse	●	○	-	○	○	○
	4.4 Aufwand/Nutzen-Verhältnis	●	○	○	●	○	●

Legende: ○ = nicht erfüllt; ◐ = teilweise erfüllt ● = erfüllt; - = keine Bewertung möglich

5.4 Zwischenfazit zum Forschungsbedarf

In diesem Kapitel wurden relevante und datenbasierte Ansätze des Stands der Forschung und Technik zur a posteriori und a priori Analyse von Änderungsausbreitungen identifiziert, beschrieben und diskutiert. Es fand eine umfassende Analyse dieser Ansätze, basierend auf den Anforderungen aus Kapitel 4, statt. Aus der Gegenüberstellung der identifizierten Ansätze anhand der Anforderungen, leitet sich schließlich folgender Forschungsbedarf ab:

Verschiedene Granularitätslevel: Es liegt ein Forschungsbedarf hinsichtlich der Realisierung unterschiedlicher Granularitätslevel in der Produktstruktur, auf denen Ausbreitungen ermittelt werden, vor. Bestehende datenbasierte Ansätze verwenden ausschließlich das Level in dem die Daten vorliegen. Durch eine Realisierung weiterer Granularitätslevel, können die Analysen für unterschiedliche Stakeholder in Unternehmen von Interesse sein, bspw. für das Änderungsmanagement oder den Bauteilentwickler.

Produkt- und Änderungsmodellierung: Es besteht in datenbasierten Ansätzen ein Forschungsbedarf hinsichtlich der Produkt- und Änderungsmodellierung. Durch eine Einbindung von zusätzlichen Produkt- und Änderungsinformationen in Änderungsausbreitungsmodellen sollen spezifischere und weitere Zusammenhänge im Modell abbildbar und damit auswertbar gemacht werden. Dadurch steigt die Qualität und Anzahl der Analysemöglichkeiten sowie der Erkenntnisgewinn aus diesen.

Verbesserung der industriellen Anwendbarkeit: Es besteht zudem Forschungsbedarf hinsichtlich der industriellen Anwendbarkeit der Ansätze bzw. der Erkenntnisse aus diesen. Zurückzuführen ist dies insbesondere auf eine fehlende Problemorientierung und -beschreibung, so dass der industrielle Mehrwert für Ansätze nicht deutlich wird. Durch eine bessere Anknüpfung an reale Problemstellungen, die in der industriellen Praxis vorliegen, sollte die industrielle Anwendbarkeit der a priori und a posteriori verbessert werden.

Verbesserung der Ergebnisqualität der Analysen: Forschungsbedarf besteht auch hinsichtlich der Ergebnisqualität der datenbasierten Ansätze zur a posteriori und a priori Analyse von Änderungsausbreitungen. Aus den Analysen sollten nachvollziehbare, präzise und quantifizierbare Zusammenhänge resultieren, so dass diese genutzt und wiederverwendet werden können.

Der beschriebene Forschungsbedarf soll ebenfalls in dieser Arbeit in den folgenden Kapiteln adressiert werden.

6. Methodik zur datenbasierten Analyse der Änderungsausbreitung

Für Industrieunternehmen mit komplexen Produkten und -portfolios stellt die Identifikation und Analyse versteckter Produktabhängigkeiten eine große Herausforderung dar. Bisherige Ansätze fokussieren zumeist ein interviewbasiertes Vorgehen, bei dem Experten Zusammenhänge auf Grundlage ihrer Expertise abschätzen. Diese Art der Informationsakquisition bindet jedoch erhebliche Mitarbeiterressourcen und ist stark vom Einschätzungsvermögen der Mitarbeiter abhängig.

In diesem Kapitel wird eine Methodik zur datenbasierten Analyse technischer Änderungen in komplexen technischen Systemen vorgestellt. Der Fokus liegt auf der Nutzung vergangener Änderungsdaten, in denen mit Hilfe von Data Mining Verfahren und einer MDM Modellierung änderungsbedingte Abhängigkeiten in der Produktstruktur identifiziert, modelliert und analysiert sowie graphisch visualisiert werden. Die dazu erforderlichen Änderungsdaten liegen in Unternehmen häufig in großen Datenbanken vor, wobei die enthaltenen Abhängigkeiten auf Grund der komplexen Datenstrukturen nicht trivial extrahiert werden können. Mit der in dieser Arbeit entwickelten Methodik ist es nun möglich, diese Abhängigkeiten für nachfolgende Entwicklungsprojekte wiederzuverwenden, um weniger, frühere, effizientere und effektivere Änderungen erzielen zu können – also die Strategien des Änderungsmanagements zu unterstützen und den Umgang mit technischen Änderungen in Unternehmen zu verbessern (vgl. Kapitel 2.1.3).

6.1 Einführung und Überblick zur Methodik

Die entwickelte Methodik zur datenbasierten Analyse technischer Änderungen²⁶ besteht aus drei Bausteinen, die den abgeleiteten Forschungsbedarf aus dem Stand der Forschung und Technik (Kapitel 5.3) aufgreifen und die handlungsleitenden Anforderungen an die Methodik (Kapitel 1 und 4) adressieren. Die Bausteine umfassen ein Vorgehen zur Extraktion von Abhängigkeiten in großen Änderungsdatenbanken zur Erstellung des Änderungsstrukturmodells, die a posteriori Analyse der Änderungsstruktur zur Identifikation von Handlungsfeldern des Änderungsmanagements und die a priori Analyse zur Vorhersage von Änderungsausbreitungen (s. Abbildung 6-1).

Der erste Baustein beschreibt das **Vorgehen zur Erstellung des Änderungsstrukturmodells**. Dieses Vorgehen umfasst die Identifikation änderungsbedingter Abhängigkeiten in der Produktstruktur durch die Verwendung vergangener Änderungsdaten sowie die Abbildung dieser Daten in einem Änderungsstrukturmodell. Für die Identifikation von Abhängigkeiten in großen Datenmengen werden Data Mining Verfahren verwendet, so dass das Vorgehen semi-automatisiert erfolgt. Dieser erste Methodikbaustein und das damit erzeugte Strukturmodell bilden die Grundlage für die beiden folgenden Bausteine: der a priori und der a posteriori Analyse der Änderungsausbreitung bzw. -struktur.

²⁶ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit nachfolgend als Methodik bezeichnet.

Die **a posteriori Analyse der Änderungsstruktur** bildet den zweiten Baustein der Methodik mit der Zielsetzung, für neue Entwicklungsprojekte und das Entwicklungsmanagement wichtige Zusammenhänge und Muster vergangener Änderungen bereitzustellen. Dies umfasst insbesondere jene Zusammenhänge, die für eine effektive Unterstützung der Strategien Vermeidung und Vorverlagerung notwendig sind. Auf diese Weise lassen sich somit weniger und frühere Änderungen in Entwicklungsprojekten realisieren. In diesem Baustein werden Strukturmerkmale und Portfolios entwickelt sowie Möglichkeiten der Integration der Erkenntnisse in neue Entwicklungsprojekte aufgezeigt. Die a posteriori Analyse adressiert dabei vor allem fehlerbedingte und spät im Entwicklungsprojekt auftretende Änderungen mit hoher Änderungsausbreitung in der Produktstruktur.

Der dritte Baustein zur **a priori Analyse der Änderungsausbreitung** zielt darauf ab, für eine vorliegende Änderung mögliche Ausbreitungspfade aufzuzeigen – also eine Vorhersage der Änderungsausbreitung innerhalb der Produktstruktur zu unterstützen. Dieser Baustein setzt ebenfalls auf dem Änderungsstrukturmodell auf und nutzt zusätzlich statistische Maßzahlen aus der Assoziationsanalyse. Die a priori Analyse stellt somit eine bessere Informationsgrundlage hinsichtlich der Ausbreitung und Auswirkung von Änderungen bereit, mit deren Hilfe fundierte Entscheidungen über Änderungen getroffen (Steigerung der Effektivität) und Iterationen, bedingt durch späte Erkenntnisse über zusätzliche Änderungsauswirkungen, vermieden werden können (Steigerung der Effizienz). Die drei Bausteine und deren Zusammenwirken sind in Abbildung 6-1 schematisch dargestellt.

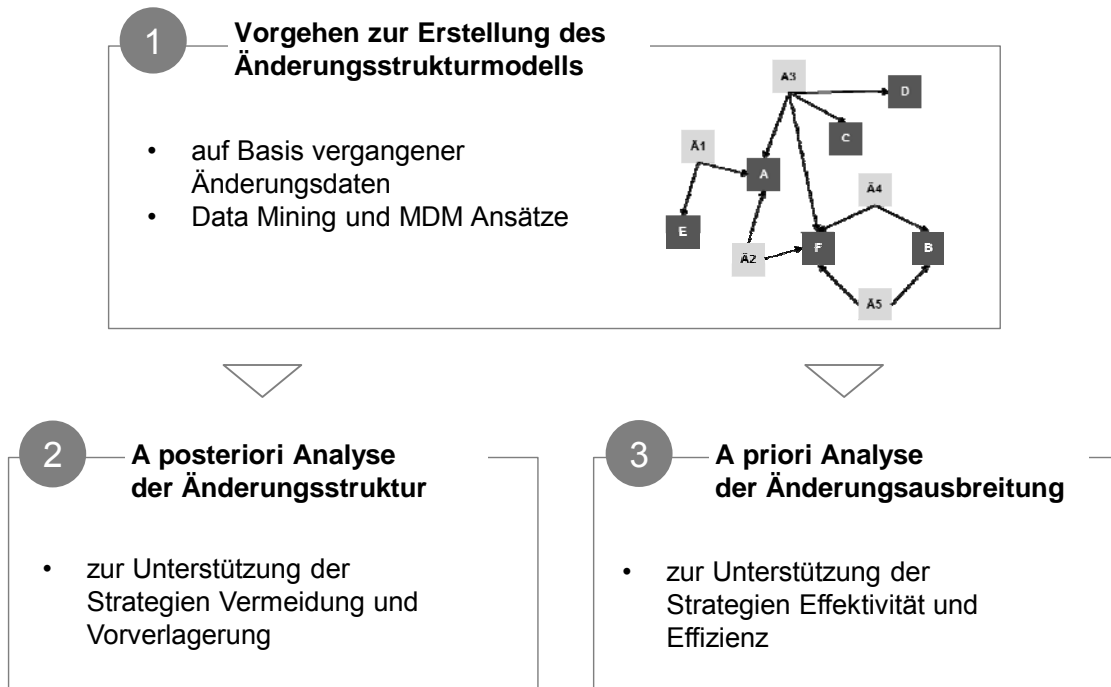


Abbildung 6-1: Überblick über die Bausteine der Methodik zur datenbasierten Änderungsanalyse

6.2 Baustein 1: Vorgehen zur Erstellung des Änderungsstrukturmodells

Im Folgenden wird zunächst das Konzept eines Änderungsstrukturmodells erläutert, ehe das sechsstufige Vorgehen zur Erstellung des Modells vorgestellt und detailliert beschrieben wird.

6.2.1 Einführung zum Änderungsstrukturmodell

Als Grundlage für die datenbasierte Strukturanalyse von Änderungen wird ein Systemmodell entwickelt, das aus Änderungen, Änderungsobjekten und deren Abhängigkeiten besteht. Zur Modellierung dieses Systems wird eine Multiple-Domain Matrix (MDM) (vgl. Kapitel 3.1.1) verwendet. Aus dem MDM-basierten Systemmodell wird das Änderungsstrukturmodell abgeleitet, das quantifizierte Änderungszusammenhänge beinhaltet, und die Basis für die nachfolgende a priori und a posteriori Analyse von Änderungsausbreitungen und -strukturen (Baustein 2 und 3) bildet. Die Abhängigkeiten im System- sowie Änderungsstrukturmodell werden aus folgenden Gründen MDM-basiert modelliert (vgl. Kapitel 3.1.1):

- Unterschiedliche Elemente und Relationsarten werden in einem Modell abgebildet, so dass Abhängigkeiten innerhalb sowie domänenübergreifend modelliert und analysiert werden können
- Abhängigkeiten lassen sich sowohl qualitativ als auch quantitativ modellieren, d. h. Stärken von Abhängigkeiten zwischen Änderungen und Bauteilen können berücksichtigt werden
- Änderungs- und Produktinformationen werden auf die wesentlichen Strukturinformationen reduziert (insbesondere wegen der großen Menge an Änderungsdaten relevant)
- Eine Vielzahl unterschiedlicher Analyse- und Berechnungsmöglichkeiten für DSM, DMM und MDM stehen zur Verfügung: Metriken, Strukturmerkmale, Berechnung indirekter Abhängigkeiten etc.
- Grafische Darstellung der Abhängigkeiten und Analyse des Systems als Graph oder Netzwerk
- Einfache, rechnerbasierte Repräsentation und Verarbeitung der Modelle

MDM und DSM haben sich in den vergangenen Jahren stetig weiterentwickelt und wurden bereits in den meisten Ansätzen zur Auswirkungsanalyse erfolgreich eingesetzt. Basierend auf der Analyse in Tabelle 10-2 wurden diese auch für diese Arbeit als erfolgsversprechendes Modellierungsverfahren gewählt. So lässt sich das datenbasierte Änderungsstrukturmodell mit weiteren bestehenden Ansätzen kombinieren und erweitern. Ein Beispiel für eine solche Erweiterung ist die Berechnung der Risiko-DSM für Änderungsausbreitungen, die zusätzlich den Änderungsaufwand berücksichtigt (vgl. Clarkson et al. 2004).

Um eine datentechnische und semi-automatische Verarbeitung umfangreicher Änderungsdatensätze zur Extraktion änderungsbedingter Abhängigkeiten zu ermöglichen, wird in dieser Dissertation eine Kombination aus dem Vorgehen des strukturellen Komplexitätsmanagements (Lindemann et al. 2009, S. 64) sowie der Aktivitäten aus dem Prozess des Knowledge Dis-

covery in Databases (KDD) von Fayyad (1996b, S. 29–31) erarbeitet. Dazu werden die Vorgehen und Tools des KDD zur Datenvorbereitung und -bereinigung in das Vorgehen zur MDM-Modellierung integriert, so dass änderungsbedingte Abhängigkeiten datenbasiert erzeugt und quantifiziert werden können.

6.2.2 Vorgehen zur Erstellung des Änderungsstrukturmodells

Das Vorgehen zur Erstellung des Änderungsstrukturmodells²⁷ umfasst sowohl die Definition und Beschreibung des Systemmodells, die Auswahl und Vorbereitung der Änderungsdaten als auch die Extraktion änderungsbedingter Abhängigkeiten im jeweiligen technischen Produkt oder Portfolio.

Das Vorgehensmodell kombiniert, wie auch das Änderungsstrukturmodell selbst, Schritte aus dem strukturellen Komplexitätsmanagements mit denen des KDD-Prozesses. So finden für die Systemdefinition und Modellierung Vorgehensweisen des strukturellen Komplexitätsmanagements Anwendung, während die Extraktion von Abhängigkeiten aus Änderungsdaten auf Aktivitäten des KDD-Prozesses (z. B. Datenvorbereitung) und dem Data Mining selbst beruht.

Dieses Modell beinhaltet quantifizierte Änderungsabhängigkeiten, die die Wahrscheinlichkeit einer Änderungsausbreitung zwischen Systemelementen widerspiegeln, sowie die Auftretenswahrscheinlichkeit und statistische Signifikanz zur Beschreibung der quantifizierten Zusammenhänge.

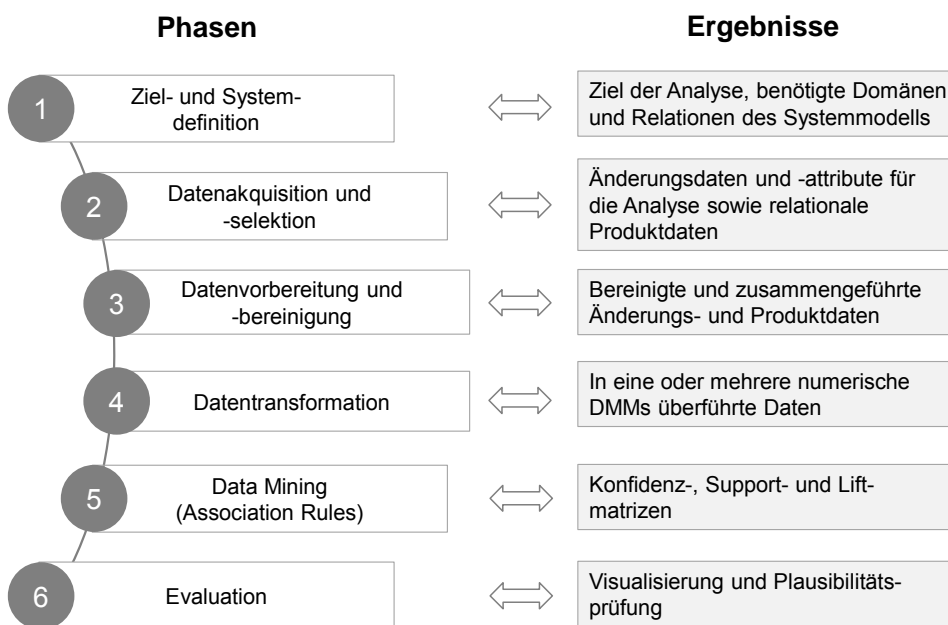


Abbildung 6-2: Vorgehen zur Erstellung des Änderungsstrukturmodells

²⁷ Die Erstellung des Änderungsstrukturmodells ist an die Vorveröffentlichung Wickel & Lindemann (2015) angelehnt.

Nachfolgend werden die sechs Stufen des Vorgehens detailliert beschrieben.

1. Ziel- und Systemdefinition

Die Systemdefinition steht in engem Zusammenhang mit der Zielsetzung und den nachfolgenden Analysen. Je genauer das System bezüglich Änderungen und betroffener Elemente der Produktstruktur definiert wird, desto detailliertere Analysen sind nachfolgend möglich und desto präzisere Zusammenhänge können erhoben werden. Dennoch können zu viele Informationen ggf. auch kontraproduktiv sein, wenn keine Struktur identifiziert werden kann. Das Systemmodell, aus dem das Änderungsstrukturmodell abgeleitet wird, beinhaltet alle relevanten Domänen sowie die änderungs- und produktbedingten Zusammenhänge zwischen diesen. Folgende Bestandteile sind demnach für das MDM-basierte Systemmodell zu definieren:

- Domänen des Systemmodells
- Detaillierungslevel der Elemente
- Relationsarten zwischen Domänen

Die Definition der technischen Änderung (vgl. Kapitel 2.1.1) verdeutlicht, dass eine technische Änderung immer ein Produkt betrifft und konstituierenden Bestandteile. Daher umfasst das Systemmodell mindestens die Domänen Änderungen und Änderungsobjekte (ein technisches Produkt mit konstituierenden Bestandteilen²⁸) sowie deren Relation, die ggf. auch weiter spezifiziert werden können.

In Abbildung 6-3 ist der Zusammenhang zwischen Änderungen und Änderungsobjekten eines technischen Produkts beispielhaft für ein Entwicklungsprojekt dargestellt.

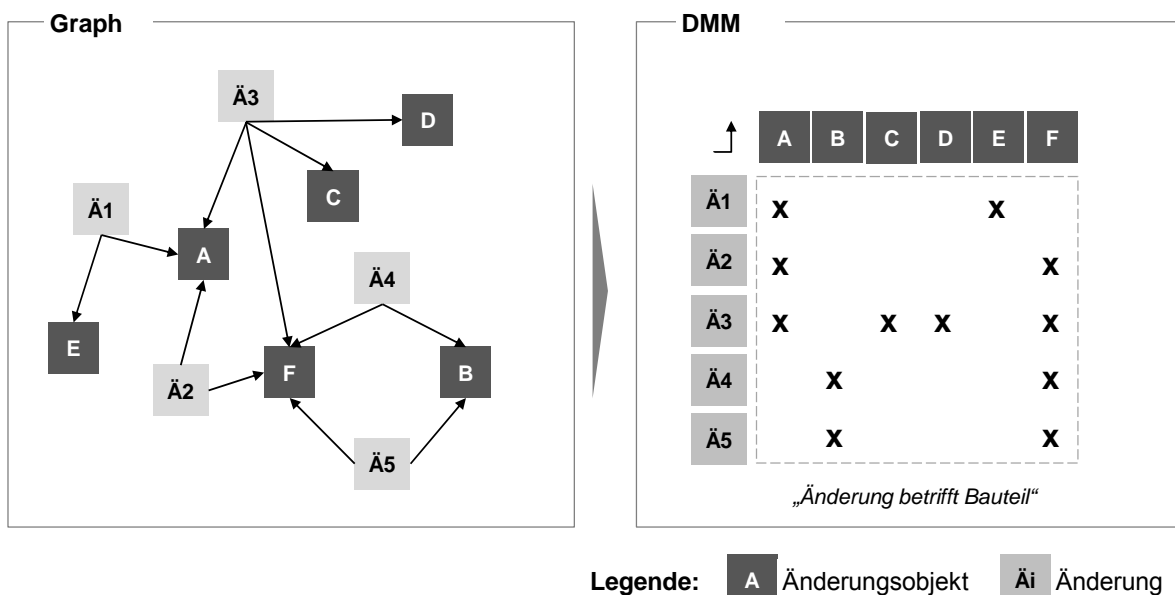


Abbildung 6-3: Elemente und Abhängigkeiten von Änderungen in einem Entwicklungsprojekt (links Graph-, rechts DMM-Darstellung)

²⁸ Bestandteile können bspw. Hardware, Software oder Dienstleistungen sein und werden vereinfacht als Komponente oder Bauteil bezeichnet.

Obwohl in der Abbildung nur wenige Änderungsobjekte und Änderungen sowie nur eine Relationsart dargestellt sind („Änderung betrifft Änderungsobjekt“), wird in diesem einfachen Beispiel bereits deutlich, dass Abhängigkeiten zwischen Änderungsobjekten schnell schwer überschaubar werden können.

Für die Modellierung der Domänen und Relationen müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Für die Domäne **Änderungsobjekte** ist mindestens eine Ebene der Produktstruktur zu wählen, so dass das Granularitätslevel des Modells (bspw. die Bauteilebene) festgelegt ist (s. Kapitel 2.1.1). Sollen allgemeine und entwicklungsprojektübergreifende Zusammenhänge zwischen Änderungsobjekten abgeleitet werden, so ist eine generische Produktstrukturebene zu wählen. Diese ermöglicht es, generische Zusammenhänge abzuleiten und wiederzuverwenden oder eine Vergleichbarkeit zwischen Entwicklungsprojekten herzustellen. Als Änderungsobjekte können auch Systemfunktionen, Software, Dienstleistungen oder von Änderungen betroffene Dokumente (bspw. Zeichnungen) in das Modell aufgenommen werden.
- Die Domäne **Änderungen** beinhaltet alle Änderungen, die während einem oder mehreren ausgewählten Produktentwicklungsprojekten an den zuvor definierten Änderungsobjekten aufgetreten sind. Optional ist es möglich, auch Attribute von Änderungen einzubeziehen. Diese ermöglichen es, die Relationen weiter zu spezifizieren. Besonders eignen sich dabei Änderungsarten oder Ursachen von Änderungen (vgl. Kapitel 2.1.1).
- Die **Relationen** zwischen den Domänen Änderungen und Änderungsobjekte lauten „Änderung betrifft Änderungsobjekt“. Durch das Einbeziehen von Änderungsattributen können die Relationen weiter spezifiziert werden (bspw. „Änderung betrifft Änderungsobjekt bei Materialänderung“).

In verschiedenen Simulationen konnten Maier et al. (2015) zeigen, dass die Wahl des Granularitätslevels in der Produktstruktur einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der nachgelagerten Analysen von Änderungsausbreitungen hat. Dieser Aspekt muss daher in der Systemdefinition und den nachfolgenden Analysen berücksichtigt werden.

Das definierte Systemmodell, das die Domänen Änderungen und Änderungsobjekte sowie mögliche Relationen aufzeigt, ist in Abbildung 6-4 dargestellt. Es beinhaltet native Daten für die Relation „Änderung betrifft Änderungsobjekt“ und erlaubt über die MDM-Methodik die Berechnung weiterer Abhängigkeiten, wie bspw. indirekte Abhängigkeiten zwischen Änderungen oder Änderungsobjekten (vgl. Kapitel 3.1.1). Darüber hinaus können ausgewählte Attribute einer Änderung zur Spezifizierung von Relation zwischen Änderungsobjekten verwendet werden. Diese erzeugen wiederum weitere DSMs für Änderungsobjekte.

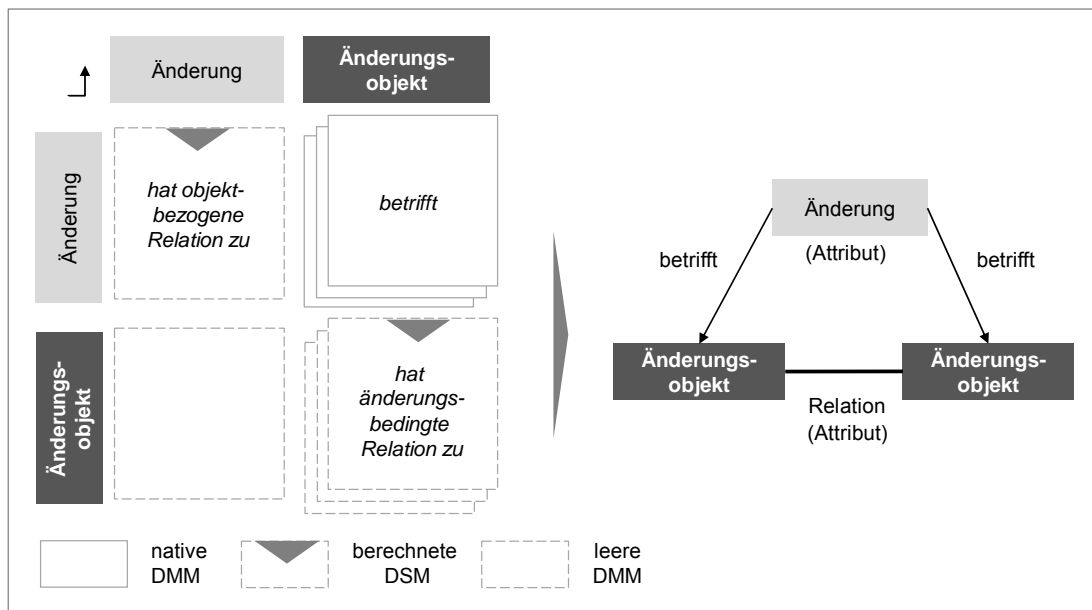


Abbildung 6-4: MDM-basierte Ableitung indirekter Abhängigkeiten zwischen Änderungsobjekten

Ausgehend von den Domänen Änderungen und Änderungsobjekten sowie deren Relationen, die mindestens ein Systemmodell beinhalten muss, können Erweiterungen und Spezifizierungen des Modells vorgenommen werden. Diese orientieren sich an vorhandenen Ansätzen (vgl. Tabelle 10-2 & Tabelle 10-3 im Anhang) und ermöglichen damit eine Kombination mit diesen (vgl. Kapitel 2.4.1). Folgende Erweiterungen und Spezifizierungen sind demnach für das Systemmodell möglich:

- Änderungsobjekte stellen zusätzlich Produktfunktionen und/oder Anforderungen des Produkts dar
- Änderungsobjekte beschränken sich nicht auf ein einzelnes technisches System sondern schließen weitere technische Systeme ein (bspw. innerhalb eines Produktportfolios)
- Änderungsobjekte umfassen auch Entwicklungs- oder Produktionsprozesse
- Änderungsrelationen werden hinsichtlich relevanter geänderter Parameter spezifiziert (z. B. Form, geometrische Abmessungen)

Diese Erweiterungen erfordern weitere Domänen und Relationsarten im erstellten Systemmodell. Abbildung 6-5 visualisiert dies beispielhaft für die Integration der Domäne Produktfunktionen. Hierzu wird die Domäne der Änderungsobjekte erweitert, wodurch weitere Relationsarten, bspw. zwischen Funktionen und Bauteilen oder zwischen Änderungen und Funktionen eines Produkts, hinzukommen.

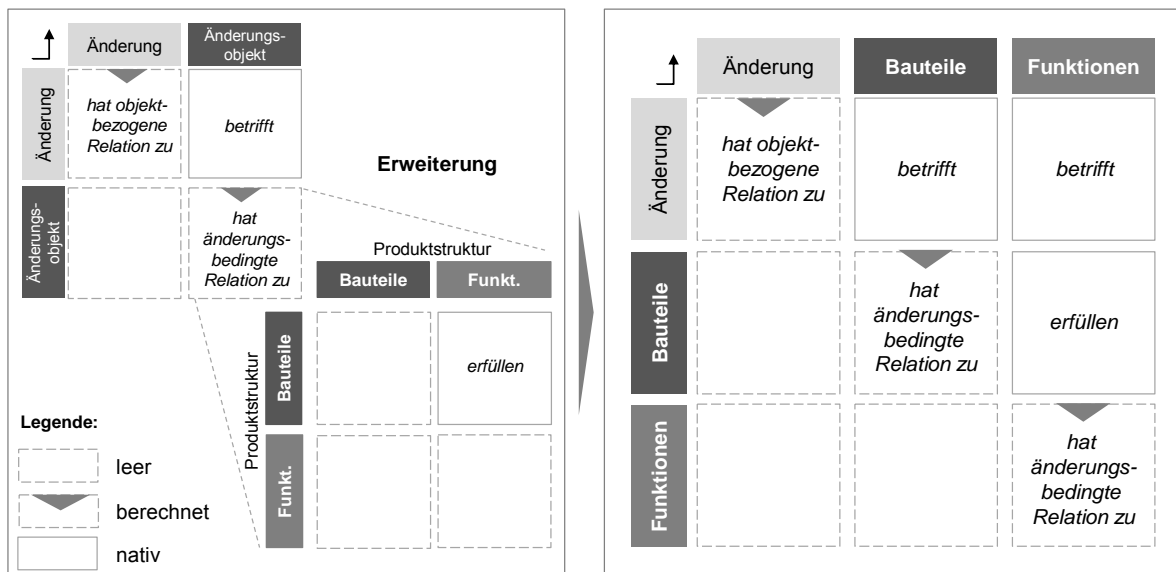


Abbildung 6-5: Erweiterungen des Basismodells um Domänen von Änderungsobjekten

Prinzipiell kann durch die Erweiterung der Domäne Änderungsobjekte und durch die Definition von Relationsarten ein umfangreiches Modell erstellt werden, das bei der späteren Analyse differenziertere Aussagen ermöglicht. Allerdings bergen überladene Modelle die Gefahr, dass diese für den Nutzer schwer verständlich und nachvollziehbar sind. Es sollten daher in der Systemdefinition nur die für die jeweilige Zielsetzung benötigten Domänen, Elemente und Relationsarten verwendet werden (Maurer 2007, S. 71).

Basierend auf der Systemdefinition wird im nachfolgenden Schritt die Auswahl und Selektion der benötigten Änderungs- und Produktdaten vorgenommen. Wird hierbei keine ausreichende Datenbasis für das System identifiziert oder liegt keine zufriedenstellende Datenqualität und -quantität vor, werden Anpassungen an der Systemdefinition erforderlich.

2. Datenakquisition und -selektion

Die vorangegangene Systemdefinition stellt die Ausgangsbasis für die Datenakquise und -selektion dar. Generell können Abhängigkeiten über Interviews und Workshops mit Experten erhoben werden oder, wie in dieser Arbeit vorgeschlagen, über die Verwendung von Datenbanken.

Für beide Arten der Informationsakquise ist es erforderlich, Informationen hoher Qualität zu erhalten, um die Ergebnisqualität nachfolgender Analysen sicherzustellen. Für die automatisierte Erhebung über Datenbanken sollten daher unbedingt von Experten durchgeführte Plausibilitätsprüfungen vorgesehen werden.

In Unternehmen liegen in der Regel umfangreiche **Datenbanken zu technischen Änderungen** vor, die strukturierte Informationen über technische Änderungen beinhalten. Für jede Änderung

liegt typischerweise eine eindeutige Identifikationsnummer vor, die beim Anlegen des Änderungsantrags vergeben wird. Bezugnehmend auf diese Änderungsnummer werden alle relevanten Informationen zur Änderung und des zugrundeliegenden Änderungsprozesses gespeichert (vgl. Kapitel 2.3). Für die Modellerstellung sind mindestens die Änderungsnummer sowie betroffene Änderungsobjekte, die wiederum über eine Identifikationsnummer zugeordnet werden, erforderlich (bspw. Bauteilnummer, Zeichnungsnummer). Für ein detaillierteres Modell (vgl. Ziel- und Systemdefinition) können darüber hinaus zusätzlich Attribute von Änderungen oder Änderungsobjekten herangezogen werden (bspw. die Art der Änderung, z. B. Material- oder Geometrieänderung, oder die Ursache, z. B. fehlerbedingt). Erweiterte Modelle können neben technischen Änderungsobjekten auch Anforderungen oder Funktionen an das Produkt oder System aufnehmen.

Zusätzlich zu den Änderungsdatenbanken bietet es sich an, auf weitere Datenbanken im Unternehmen zurückzugreifen und in die Datenakquise einzuschließen. Insbesondere **PDM- und PLM-Systeme** beinhalten Daten, die sich für die Erhebung von produkt- und prozessbezogenen Abhängigkeiten eignen. In diesen sind bspw. die hierarchische Produktstruktur oder die Zuordnung von Funktionen oder Anforderungen zu Bauteilen dokumentiert.

Abbildung 6-6 gibt einen Überblick über Relationen des Systemmodells und möglicher Datenquellen, die zur Erhebung der erforderlichen Daten verwendet werden können. So eignen sich bspw. Änderungsdatenbanken zur Ableitung von Zusammenhängen zwischen Änderungen und Änderungsobjekten, während für Produkt- und Prozessabhängigkeiten PDM- und PLM-Systeme herangezogen werden können.

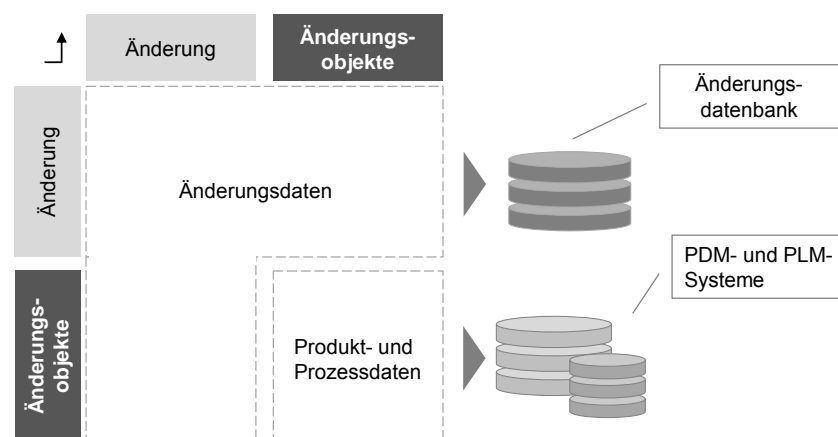


Abbildung 6-6: Mögliche Quellen für das Systemmodell

3. Datenvorbereitung und -bereinigung

Die Daten, die zur Erstellung des Modells benötigt werden, liegen häufig in unterschiedlichen Datenbanken vor und sind daher im Rahmen der Datenvorbereitung zunächst zusammenzuführen. Dies geschieht in der Regel unter Verwendung einer eindeutigen Änderungsnummer, die eine Zuordnung gestattet. Da Datenbanken zudem häufig Fehler und Inkonsistenzen beinhalten,

sollten die Daten bereinigt werden, um eine gute Ergebnisqualität erzielen zu können. Die enthaltenen Fehler und Inkonsistenzen lassen sich auf unterschiedliche Ursachen zurückführen. Häufig liegt bereits eine falsche Nutzereingabe zugrunde oder es entstehen Fehler beim Zusammenführen von Daten aus verschiedenen Informationssystemen. Die Folge sind Redundanzen und Widersprüche in den Daten sowie unvollständige Datensätze. Können diese Fehler nicht beseitigt werden, ist zu überprüfen, welche Wirkung diese auf nachfolgende Analysen haben. So kann festgestellt werden, ob fehlerhafte Einträge durch Default-Wert ersetzt werden können (Frawley et al. 1992, S. 62).

Aufgrund der umfangreichen Daten sollte für den Schritt der Datenvorbereitung und -bereinigung eine Software eingesetzt werden, die das beschriebene Vorgehen unterstützt. Hierzu eignen sich insbesondere Data Mining Tools, die entsprechende Operatoren zur automatisierten Vorbereitung und -bereinigung beinhalten (vgl. Kapitel 3.2).

4. Datentransformation

In diesem Schritt werden die ausgewählten und bereinigten Änderungsdaten in das Datenformat überführt, das für die Durchführung des eigentlichen Data Minings vorausgesetzt wird. Für die Assoziationsanalyse (vgl. Kapitel 3.2) ist dies eine numerische Datenmatrix, die auf Basis der erstellten Datentabellen aus dem vorangegangenen Schritt erstellt wird. Mit Operatoren²⁹ von Data Mining Tools kann die Transformation automatisiert und auch für sehr große Datenmengen in einer entsprechenden Softwareumgebung erfolgen. Die Datentransformation ist in Abbildung 6-7 schematisch dargestellt. Durch die Transformation entsteht eine DMM ($DMM_{\ddot{A}-O}$), die die Zusammenhänge zwischen Änderungen und Änderungsobjekten (z. B. Bauteilen) abbildet.

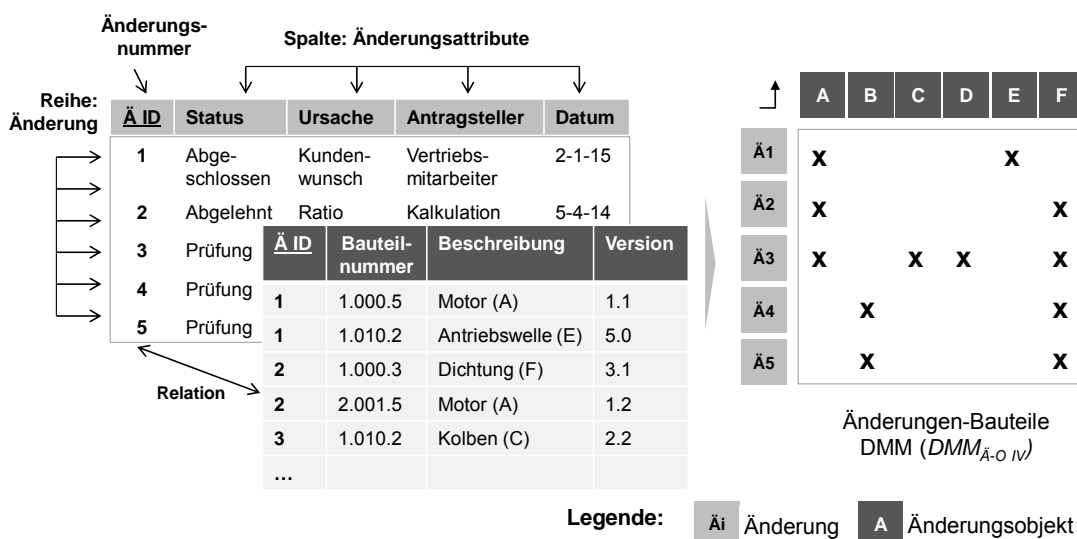


Abbildung 6-7: Überführung der Änderungsdaten in eine Domain Mapping Matrix (DMM)

²⁹ RapidMiner bietet für die Transformation bspw. die Operatoren „nominal to binominal“, „numerical to binominal“ oder den „pivot-Operator“ an.

Neben der Transformation in das richtige Datenformat kann in diesem Schritt auch die Transformation der Daten auf die gewünschte Produktstrukturebene durchgeführt werden. Hierzu wird eine Transformations-DMM erstellt, die diesen Zusammenhang zwischen den Produktstrukturebenen darstellt. Diese Zusammenhänge lassen sich unter Verwendung vorhandener Produktstrukturdaten ebenfalls datenbasiert erheben. In mathematischer Hinsicht wird die Datentransformation, wie in Abbildung 6-8 dargestellt, über eine Matrixmultiplikation realisiert.

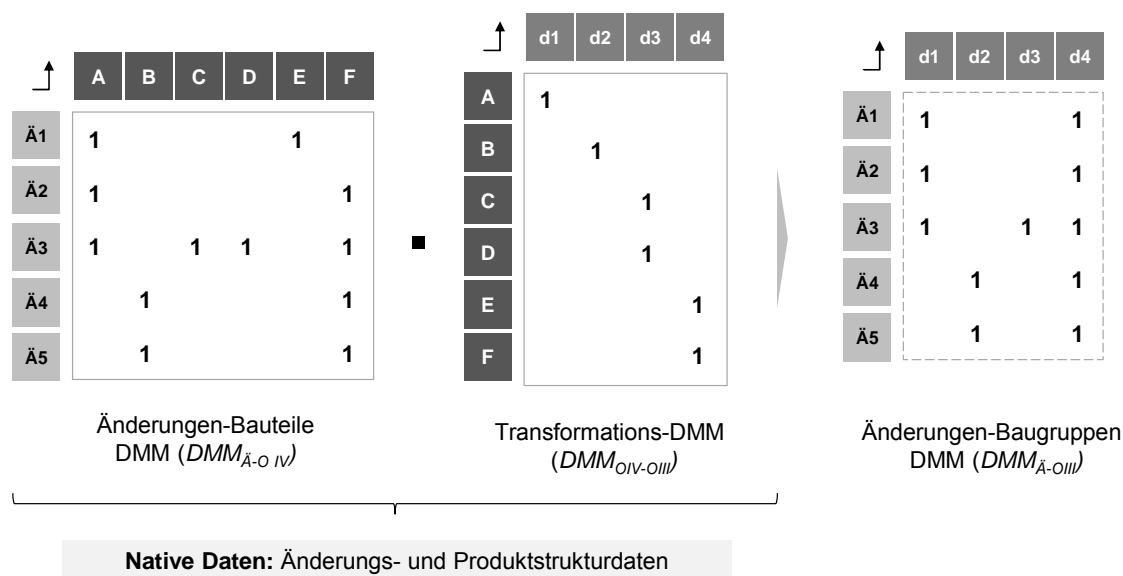


Abbildung 6-8: Transformationsmatrix (Mitte) zur Berechnung der änderungsbedingten Abhängigkeiten im definierten Granularitätslevel

Die erzeugte DMM mit den Abhängigkeiten zwischen Änderungen und den für das jeweilige Granularitätslevel des technischen Systems beschriebenen Änderungsobjekten ist das Resultat aus diesem Schritt der Datentransformation.

5. Data Mining

Nachdem alle relevanten Produkt- und Änderungsdaten ausgewählt, bereinigt, transformiert und in eine numerische Datenmatrix überführt wurden, beginnt im Schritt Data Mining mit der Anwendung der Assoziationsanalyse die eigentliche Datenanalyse. Das Ziel ist dabei das Auffinden von starken Zusammenhängen zwischen Änderungsobjekten. Ein möglicher Zusammenhang lautet bspw. „Wenn die Düse des Haartrockners geändert wird, dann wird mit einer 40 %igen Wahrscheinlichkeit auch das Lüftungsgitter geändert“. Dieser Zusammenhang wird über die Suche nach häufig gemeinsam auftretenden Änderungsobjekten in der numerischen Änderungsmatrix gefunden.

Für die Ermittlung der quantifizierten Zusammenhänge werden die Maßzahlen Support, Konfidenz und Lift verwendet (vgl. Kapitel 3.2), die für Änderungsabhängigkeiten wie folgt definiert werden.

- Der **Support** gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die aufgestellte Regel in der Gesamtzahl an Änderungen auftritt.

$$\text{Support}(X \rightarrow Y) = \frac{\text{Anzahl Änderungen, die } X \& Y \text{ betreffen}}{\text{Gesamtanzahl Änderungen}} \quad \text{Formel 6-1}$$

- Der **Konfidenz** gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit bei der Änderung eines bestimmten Objekts auf die Änderung eines weiteren Objekts geschlossen werden kann.

$$\text{Konfidenz}(X \rightarrow Y) = \frac{\text{Anzahl Änderungen, die } X \& Y \text{ betreffen}}{\text{Gesamtanzahl Änderungen, die } X \text{ betreffen}} \quad \text{Formel 6-2}$$

- Der **Lift** beschreibt, wie relevant ein Zusammenhang ist, indem der Konfidenz einer Regel ($X \rightarrow Y$) mit dem erwarteten Auftreten von Y (Support) in Bezug gesetzt wird.

$$\text{Lift}(X \rightarrow Y) = \frac{\text{Konfidenz}(X \rightarrow Y)}{\text{Support}(Y)} \quad \text{Formel 6-3}$$

In dieser Arbeit werden paarweise Abhängigkeiten zwischen den Änderungsobjekten in vergangenen Änderungsdaten basierend auf Support, Konfidenz und Lift quantifiziert. Die Bewertung und Auswahl relevanter Zusammenhänge erfolgt in den nachgelagerten Änderungsanalysen (vgl. Kapitel 6.3.2 und 6.4.2). Die Berechnungsformeln für die Maßzahlen Konfidenz, Support und Lift sind im Rahmen dieser Arbeit für die Matrixberechnung angepasst und damit für die MDM-basierte Ableitung quantifizierter Änderungsstrukturen nutzbar gemacht worden.

Zunächst werden die indirekten Abhängigkeiten zwischen Änderungsobjekten auf Basis der Abhängigkeiten zwischen Änderungen und Änderungsobjekten ($DMM_{\ddot{A}-O}$) gemäß der MDM Methodik berechnet:

$$DSM_{O-O, \ddot{A}nderungen} = DMM_{\ddot{A}-O}^T \cdot DMM_{\ddot{A}-O} \quad \text{Formel 6-4}$$

Die resultierende $DSM_{O-O, \ddot{A}nderungen}$ ist in Abbildung 6-9 abgebildet.

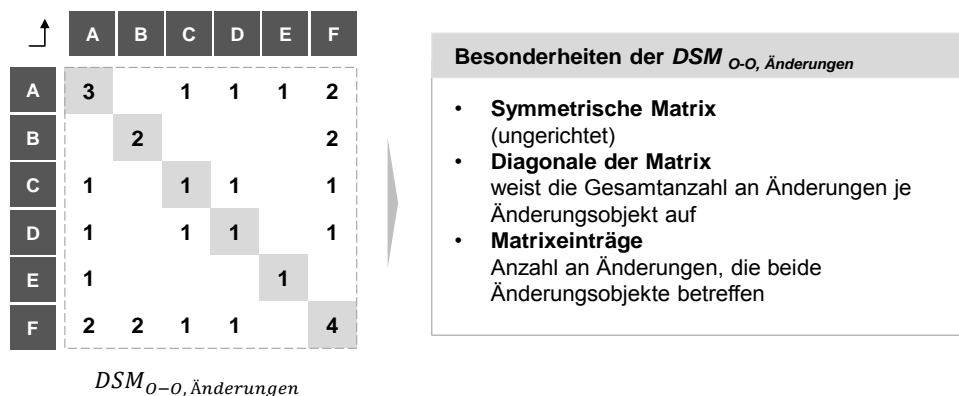


Abbildung 6-9: Abgeleitete Änderungsobjekt $DSM_{O-O, \ddot{A}nderungen}$

Die Diagonale gibt die Gesamtanzahl an Änderungen des jeweiligen Änderungsobjekts an, die verbleibenden Einträge benennen die Anzahl an Änderungen, die die jeweiligen Änderungsobjekte betreffen.

Die $DSM_{O-O, \text{Änderungen}}$ ist die Ausgangsbasis für die nachfolgende, matrixbasierte Berechnung von Support, Konfidenz und Lift. Die $DSM_{O-O, \text{Änderungen}} = (a_{ij})$ ist eine symmetrische Matrix vom Typ $(n \times n)$. Für die Berechnung des Konfidenz wird eine Diagonalmatrix benötigt, die die Gesamtanzahl an Änderungen je Änderungsobjekt enthält. Diese wird in dieser Arbeit wie folgt definiert:

$$D = \text{diag} (a_{11} \quad a_{22} \quad \dots \quad a_{nn}) \quad \text{Formel 6-5}$$

Die Gesamtanzahl an Änderungen wird aus der DMM_{A-O} vom Typ einer $m \times n$ Matrix gewonnen. m repräsentiert dabei die Gesamtanzahl an Änderungen und n die Anzahl an Änderungsobjekten.

Die matrixbasierte Berechnung von **Support**, **Konfidenz** und **Lift** erfolgt für sämtliche Änderungsrelationen unter Verwendung der folgenden entwickelten Gleichungen:

$$DSM_{\text{Support } O-O, \text{Änderungen}} = DSM_{O-O, \text{Änderungen}} \cdot \frac{1}{m} \quad \text{Formel 6-6}$$

$$DSM_{\text{Konfidenz } O-O, \text{Änderung}} = (DSM_{O-O, \text{Änderung}} \cdot D^{-1})^T \quad \text{Formel 6-7}$$

$$DSM_{\text{Lift } O-O, \text{Änderungen}} = DSM_{\text{Konfidenz } O-O, \text{Änderungen}} \cdot \left(\frac{1}{m} \cdot D\right)^{-1} \quad \text{Formel 6-8}$$

Unter Verwendung der Gleichungen werden drei neue DSMs berechnet, die in Abbildung 6-10 dargestellt sind.

Relative Änderungshäufigkeit		Änderungsausbreitungswahrscheinlichkeit		Stochastische Unabhängigkeit		
	A	B	C	D	E	F
A	0,6	0	0,2	0,2	0,2	0,4
B	0	0,4	0	0	0	0,4
C	0,2	0	0,2	0,2	0	0,2
D	0,2	0	0,2	0,2	0	0,2
E	0,2	0	0	0	0,2	0
F	0,4	0,4	0,2	0,2	0	0,8

$DSM_{\text{Support } O-O, \text{Änderungen}}$

	A	B	C	D	E	F
A	1	0	0,33	0,33	0,33	0,67
B	0	1	0	0	0	1
C	1	0	1	1	0	1
D	1	0	1	1	0	1
E	1	0	0	0	1	0
F	0,5	0,5	0,25	0,25	0	1

$DSM_{\text{Konfidenz } O-O, \text{Änderung}}$

	A	B	C	D	E	F
A	1,67	0	1,67	1,67	1,67	0,83
B	0	2,5	0	0	0	1,25
C	1,67	0	5	5	0	1,25
D	1,67	0	5	5	0	1,25
E	1,67	0	0	0	5	0
F	0,83	1,25	1,25	1,25	0	1,25

$DSM_{\text{Lift } O-O, \text{Änderungen}}$

Abbildung 6-10: Support, Konfidenz und Lift DSM für Änderungsobjekte

Die **Support DSM** beschreibt die relative Änderungshäufigkeit eines Änderungsobjekts (Diagonale) bzw. zweier Änderungsobjekte (verbleibende Matrix) in der Änderungsdatenbank und liegt zwischen 0 und 1. Die **Konfidenz DSM** gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit welcher die Änderung eines Änderungsobjekts (Zeile) mit der Änderung eines weiteren Objekts (Spalte) einhergeht. Im Gegensatz zur Support DSM ist die Konfidenz DSM nicht symmetrisch und besitzt eine Richtungsabhängigkeit. Verdeutlicht an der $DSM_{\text{Konfidenz } O-O, \text{Änderungen}}$ in Abbildung

6-10 bedeutet dies, dass Änderungen an Änderungsobjekt A in nur 33 % der Fälle mit einer Änderung an C einhergingen. Hingegen führte eine Änderung an Änderungsobjekt C in der Vergangenheit immer zu einer Änderung an A. Die Werte für die Konfidenz liegen zwischen 0 und 1. Die **Lift DSM** verdeutlicht wie hoch der Konfidenzwert den Erwartungswert innerhalb der Regeln übertrifft und gibt Auskunft über die stochastische Unabhängigkeit eines Zusammenhangs in der DSM. Für die Relation zwischen Änderungsobjekt A und C mit einem Lift von 1,67 bedeutet dies, dass Änderungsobjekt C 0,67-mal häufiger mit A zusammen in Änderungen betroffen ist als mit anderen Änderungsobjekten. Für einem Lift > 1 liegt eine positive Korrelation vor.

Für die Ableitung der indirekten Abhängigkeiten aus der DMM und die Berechnungen der DSMs (Support, Konfidenz und Lift) wurde für R³⁰ ein Berechnungscode erstellt, der die Berechnung großer Matrizen ermöglicht. Dieser Berechnungscode für R ist im Anhang in Tabelle 10-14 dargelegt.

6. Evaluation

Der letzte Schritt zur Erstellung des Änderungsstrukturmodells sieht eine Überprüfung der erstellten Matrizen hinsichtlich ihrer Richtigkeit vor. Dieser Schritt ist besonders wichtig, um die Qualität der nachfolgenden und darauf aufbauenden Analysen sicherzustellen. Die Evaluation sollte unter Einbindung von Experten stattfinden, die ein gutes Verständnis über das Produkt und die technischen Änderungen (bspw. Angehörige des Änderungsgremiums) haben. Im Rahmen der Evaluation ist zu überprüfen, ob das Modell die änderungsbedingten Zusammenhänge richtig abbildet und diese plausibel sind. Hierfür eignet sich eine Visualisierung der Matrizen als Graph sowie eine Betrachtung der Extremwerte und Ausreißer. Lässt sich in diesem Schritt keine Plausibilität des Änderungsstrukturmodells nachweisen, sind die vorangegangenen Schritte im Vorgehen sowie die Qualität der Änderungsdaten kritisch zu hinterfragen und ggf. anzupassen. Zumeist zeigt bereits der Graph an welchen Stellen Anpassungen im Vorgehen erforderlich sind. Anschließend sollten die Phasen erneut durchlaufen werden ehe in der letzten Phase wiederum die Überprüfung stattfindet.

6.3 Baustein 2: A posteriori Analyse der Änderungsstruktur

Das Änderungsstrukturmodell bildet änderungsbedingte Zusammenhänge in der Produktstruktur ab, die in Änderungsdatenbanken identifiziert wurden. Durch das Vorgehen und der teilweisen Automatisierung (s. Kapitel 6.2.2) können umfangreiche Änderungsmodelle mit vielen Elementen (Änderungsobjekten) und Interdependenzen auf verschiedenen Granularitätslevel abgeleitet werden. Um aus diesen Modellen die für das Änderungs- und Entwicklungsmanagement relevanten Zusammenhänge zu extrahieren, ist eine systematische Analyse notwendig. Die a posteriori Analyse ermöglicht es, die für die Strategien Vermeidung und Vorverlagerung

³⁰ Die Statistik-Software R ist eine objekt-orientierte interaktive Programmiersprache für statistische Auswertungen (siehe www.r-project.org).

relevanten Zusammenhänge in der Produktstruktur zu identifizieren, so dass für diese Änderungsobjekte nachgelagert Maßnahmen eingeleitet werden können.

Die in dieser Arbeit verwendeten Analysen nutzen Strukturmodelle, die in Form von MDMs vorliegen (vgl. Kapitel 3.1.1). Prinzipiell ist die Analyse jedoch für jegliche Modelle, die auf Graphen oder Netzwerken basieren, anwendbar. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte a posteriori Analyse umfasst sowohl qualitative als auch quantitative Strukturzusammenhänge, wobei letztere insbesondere für die Bewertung und Priorisierung von änderungsrelevanten Strukturen von Bedeutung sind.

6.3.1 Anwendungsgebiet der a posteriori Analyse

Dieses Unterkapitel beschreibt das Anwendungsgebiet für die a posteriori Analyse der Änderungsstruktur. Dazu werden zunächst die Zielsetzung und -gruppe erläutert, um anschließend die Anwendungsmöglichkeiten der Analyse in der industriellen Praxis auszuarbeiten.

Welche Zielsetzung verfolgt die Analyse?

Die Analyse der änderungsbedingten Produktstruktur aus vergangenen Entwicklungsprojekten zielt darauf ab, Verbesserungspotenziale für das Änderungs- und Entwicklungsmanagement zu identifizieren. Durch die retrospektive Analyse werden Erkenntnisse gewonnen, die in neuen Produktentwicklungen und zugehörigen Prozessen eingesetzt werden können, um weniger (Vermeidung von Änderungen) und frühere Änderungen (Vorverlagerung) mit weniger hohen Auswirkungen in Entwicklungsprojekten zu erzielen.

Bisher gibt es für Unternehmen wenig konkrete Unterstützung bei der Umsetzung der Strategien der Änderungsvermeidung und -vorverlagerung. Ebendieses Ziel wird mit der Analyse des Änderungsstrukturmodells verfolgt, um Unternehmen bei der Identifikation der relevanten Schwachstellen in der Produktstruktur und bei der Auswahl von Möglichkeiten zur Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen zu unterstützen. Darüber hinaus unterstützt die Analyse die Identifikation der Handlungsschwerpunkte innerhalb der Produktstruktur, deren Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen das größte Potenzial bietet.

Wer ist die Zielgruppe der Analyse und wie werden Ergebnisse genutzt?

Den größten Nutzen aus der Analyse von Änderungsstrukturen ziehen Entwicklungs- und Änderungsmanager, indem diese bereits zur Planung des Entwicklungsprojekts wichtige Informationen über Änderungszusammenhänge und -häufigkeiten erhalten. Treten beispielsweise gehäuft fehlerbedingte Änderungen im Entwicklungsprozess an einer bestimmten Produktkomponente auf und hat die Änderung dieser Komponente stets eine hohe Änderungsausbreitung innerhalb des Produkts oder Portfolio, so ist dies ein Signal zur Anwendung der Strategie Vermeidung. Das Entwicklungsmanagement sollte daraufhin in zukünftigen Entwicklungen das Produkt oder die Produktstruktur basierend auf den Analysen anpassen, so dass die Wahrscheinlichkeit der Änderungsausbreitung zwischen Komponenten und Modulen des Systems verringert wird. Außerdem können organisatorische Vorkehrungen getroffen werden, mit denen die Kommunikation zwischen Bauteilverantwortlichen gefördert wird und mögliche Änderungsbedarfe bereits vor der Bauteilfreigabe erkannt und behoben werden können. Eine engere Zusammenarbeit von Organisationseinheiten kann zudem zu einer Erhöhung des Bewusstseins

für Änderungsausbreitungen führen und Entwicklern ein besseres Verständnis über den eigenen Verantwortungsbereich hinaus erzeugen. Treten häufig späte Änderungen auf, können diese durch zusätzliche Absicherungen in nachfolgenden Entwicklungsprozessen früher als bisher erkannt werden.

Wann empfiehlt sich eine Anwendung der Analyse?

Die Analyse ist insbesondere für Produkte empfehlenswert, die eine hohe Änderungskomplexität aufweisen. Diese liegt vor, wenn viele Änderungen an vielen verschiedenen Produktkomponenten auftreten, die wiederum eine Vielzahl an änderungsbedingten Relationen zueinander aufweisen und so schwer zu überblicken sind. Zudem empfiehlt sich die a posteriori Analyse für Unternehmen, in denen eine große Arbeitsteilung vorherrscht. Denn wirken viele unterschiedliche Parteien an der Produktentwicklung und dem Änderungsprozess mit, wird das Verständnis über das Gesamtsystem und den Prozess für den Einzelnen erschwert. Durch die Analyse werden systematisch und objektiv Zusammenhänge mittels Strukturkriterien bewertet, die für die Auswahl der richtigen Strategien innerhalb eines oder mehrerer technischer Produkte von Bedeutung sind.

Um die Erkenntnisse aus vergangenen Entwicklungsprojekten auf neue Projekte übertragen zu können, muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass sowohl das System als auch der zugrunde liegende Entwicklungsprozess hinreichend ähnlich sind. Nur dann kann davon ausgegangen werden, dass ein vergleichbares änderungsbedingtes Verhalten in der Produktentwicklung auftritt. Sind Produkt und Entwicklungsprozess über verschiedene Entwicklungen hinweg zu unterschiedlich, werden unter Umständen nicht die richtigen Maßnahmen eingeleitet und der intendierte Mehrwert, der durch die Methodik erzielt werden soll, wird nicht ausgeschöpft. Da die Erkenntnisse aus der Analyse der Änderungsstruktur sehr spezifisch und vom Produkt als auch dessen Entwicklung abhängig sind, ist eine direkte Nutzung der Ergebnisse über Unternehmensgrenzen hinweg nicht möglich.

6.3.2 A posteriori Analyse der Änderungsstruktur

In diesem Kapitel werden spezifische Strukturmerkmale für die a posteriori Analyse der Änderungsstruktur erarbeitet. Hierbei sind Strukturmerkmale in Verbindung zu verschiedenen Änderungsattributen anzuwenden, z. B. der Änderungsursache oder dem Zeitpunkt einer Änderung, um die Handlungsschwerpunkte für die Strategien Vermeidung und Vorverlagerung aufzuzeigen.

Die Strategie der Vermeidung steht in engem Bezug zur Ursache von Änderungen. Denn wird die Ursache vermieden, so gilt gleiches für die dadurch bedingte Änderung. In der Literatur wird allerdings auch darauf verwiesen, dass es nicht sinnvoll ist, alle Änderungen zu vermeiden (vgl. Clark & Fujimoto 1991, S. 121; Fricke et al. 2000). Dies gilt vor allem dann, wenn diese einer Verbesserung der Wettbewerbssituation des Unternehmens dienen, indem bspw. Kosten reduziert werden, die Qualität verbessert oder auf sich ändernde Marktanforderungen reagiert wird. Daher wird für die Auswahl der Strategie Vermeidung die in Kapitel 2.1.1 eingeführte Unterscheidung von Änderungstypen entsprechend ihrer Ursachen herangezogen. Vereinfacht sind fehlerbedingte Änderungen oder Änderungen, die aus einer Änderungsausbreitung entste-

hen, als vermeidbar anzusehen. Verbesserungsbedingte Änderungen hingegen sind nicht unbedingt vermeidbar. Für diese nicht vermeidbaren Änderungstypen eignet sich die Strategie der Vorverlagerung. Dabei werden die Änderungen fokussiert, die erst spät im Entwicklungsprozess auftreten und häufig zu Änderungsausbreitungen führen. Durch eine frühe Identifikation dieser Änderungen sollen die Änderungsauswirkungen verringert werden.

Zusammenfassend lassen sich die in Tabelle 6-1 dargestellten Merkmale und Ausprägungen verwenden, um retrospektiv die richtige Strategie für Änderungen auszuwählen. Die Änderungsausbreitung wurde als eigenes Merkmal dargestellt, da diese bspw. mit fehler- und verbesserungsbedingten Änderungen einher geht und sogar durch diese ausgelöst werden kann.

Tabelle 6-1: Merkmalschema für Änderungen zur Unterstützung der Vorverlagerung und Vermeidung

Merkmale	Merkmalsausprägung			
Änderungstyp nach Ursache	Fehlerbedingte Änderungen		Verbesserungsbedingte Änderungen	
Zeitpunkt der Änderung	früh		spät	
Änderungsausbreitung	gering	mittel		hoch
Häufigkeit	selten	manchmal	gelegentlich	häufig

Strukturmerkmale zur Bewertung der Änderungsausbreitung und -häufigkeit

In vorangegangenen Arbeiten am Lehrstuhl für Produktentwicklung wurden verschiedene Sammlungen an Strukturmerkmalen vorgeschlagen. Lindemann et al. (2009) stellen eine umfassende Sammlung an Strukturmerkmalen zusammen und unterteilen diese in Analysen für gerichtete und ungerichtete Strukturmodelle. Kreimeyer & Lindemann (2011) adressieren Metriken für Entwicklungsprozesse, die für gerichtete Netzwerke anwendbar sind.

Um die Auswahl an Strukturmerkmalen zur Analyse von Produktstrukturmodelle zu unterstützen, führt Biedermann (2014) eine Untersuchung von 23 Strukturmerkmalen durch. Diese Strukturmerkmale stammen aus den zuvor genannten Vorarbeiten und der Graphentheorie. In einer empirischen Untersuchung, die sich auf 124 Produktstrukturmodelle bezieht, werden Korrelationen zwischen diesen Strukturmerkmalen ermittelt. Auf dieser Basis konnte die Anzahl an relevanten Strukturmerkmalen erheblich reduziert werden. Ergebnis ist ein minimaler Satz an globalen und lokalen³¹ Strukturmerkmalen der dennoch aussagekräftige Ergebnisse liefert (Biedermann 2014).

Dieser minimale Satz an Strukturmerkmalen, dargestellt in Tabelle 6-2, wird als Grundlage für die Strukturanalyse in dieser Arbeit verwendet, um mit möglichst wenigen Kriterien eine zielgerichtete, effektive Analyse des Änderungsmodells zu ermöglichen.

³¹ Lokale Strukturmerkmale betreffen einzelne Elemente, globale Strukturmerkmale die gesamte Struktur.

Tabelle 6-2: Minimaler Satz an Strukturmerkmalen zur Analyse von Produktstrukturen

	Strukturmerkmale	Beschreibung
Global	Anzahl an Knoten	Anzahl an Knoten in einem Netzwerk.
	Anzahl an Kanten	Anzahl an Kanten in einem Netzwerk.
	\emptyset Knotengrad	Verhältnis von Anzahl Kanten zu Anzahl Knoten.
	Anzahl an Zyklen	Anzahl an Kantenketten, die einen Kreis formieren.
	Anzahl an Cliques	Anzahl an Clustern, die vollständig verknüpft sind.
	\emptyset Anzahl an Blöcken je Knoten	Durchschnittliche Anzahl an Blöcken pro Knoten.
Lokal	Knotengrad	Anzahl benachbarter Knoten.
	Clustering Koeffizient	Relationale Dichte der lokalen Lage des Knoten.
	Distanzzentralität	Minimale Distanz zu jedem Knoten.
	\emptyset Distanz zu Knoten	Durchschnittliche Distanz zu Knoten.

In dieser Arbeit werden vor allem lokale Strukturmerkmale verwendet, um einzelne Änderungen und Änderungsobjekte sowie deren Vernetzung bestimmen zu können. Globale Strukturmerkmale hingegen liefern sehr allgemeine Informationen über ein Strukturmodell und werden zur Interpretation der lokalen Strukturmerkmale vergleichend herangezogen. Es werden hierbei die Anzahl der Knoten und Kanten sowie deren Verhältnis zueinander (über den durchschnittlichen Knotengrad) verwendet.

Die Strukturmerkmale werden auf sämtliche DSMs und DMMs des Änderungsstrukturmodells angewendet, da eine domänen- und relationsspezifische Analyse ein differenziertes Ergebnis erzielt. Daraus ergeben sich in Summe folgende generelle Strukturanalysen für das Änderungsstrukturmodell (s. Tabelle 6-3).

Tabelle 6-3: Strukturmerkmale für ein relations- und domänenspezifischen Analyse des Änderungsstrukturmodells

	Strukturmerkmale	Änderungsstrukturmodell	Beispiel
Global	Anzahl an Knoten	DMMs	DMM $_{\bar{A}-0}$
	Anzahl an Kanten	DSMs und DMMs	DMM $_{\bar{A}-0}$
	\emptyset Knotengrad (gewichtet ungewichtet)	DSMs und DMMs	DSM $_{0-0}$, DMM $_{\bar{A}-0}$
Lokal	Knotengrad (gewichtet und ungewichtet)	DSMs und DMMs	DSM $_{0-0}$, DMM $_{\bar{A}-0}$
	Clustering Koeffizient	DSMs	DSM $_{0-0}$
	Distanzzentralität	DSMs	DSM $_{0-0}$
	Mittlere Distanz zu Knoten (gewichtet und ungewichtet)	DSMs	DSM $_{0-0}$

Im Kontext des Änderungsstrukturmodells können die ausgewählten Strukturmerkmale wie nachfolgend beschrieben interpretiert werden.

Die **Anzahl der Knoten und Kanten des Änderungsstrukturmodells** (in Bezug zu ihren Domänen) sind globale Kenngrößen, die Aufschluss über die Größe und Struktur des Modells geben. Dies umfasst:

- Gesamtanzahl an Änderungen, die sich im Änderungsstrukturmodell befinden (Anzahl der Knoten der Domäne Änderungen).
- Anzahl der Änderungsobjekte, z. B. Bauteile oder Baugruppen, die von Änderungen betroffenen sind (Anzahl der Knoten der Domäne Änderungsobjekte).
- Anzahl der Änderungen an Änderungsobjekten (Anzahl der Abhängigkeiten zwischen Änderungen und Änderungsobjekten).
- Anzahl der Abhängigkeiten zwischen Änderungsobjekten aufgrund gemeinsamer Änderungen (Anzahl der Kanten zwischen Änderungsobjekten).

Der **durchschnittliche Knotengrad** zeigt, wie stark Elemente (z. B. Änderungsobjekte) durchschnittlich vernetzt sind, indem Abhängigkeiten und Elemente des Änderungsstrukturmodells ins Verhältnis gesetzt werden. Liegen gewichtete Abhängigkeiten vor, wie bspw. für Konfidenz und Support, ist es möglich, einen gewichteten Knotengrad zu berechnen:

- Anzahl der Änderungsobjekte, die durchschnittlich Umfang einer Änderung sind (durchschnittlicher Knotengrad der Änderungen aus der DMM).
- Anzahl der Änderungen, die durchschnittlich an einem Änderungsobjekte stattfinden (durchschnittlicher Knotengrad der Änderungsobjekte aus der DMM).
- Anzahl der durchschnittlichen Abhängigkeiten von Änderungsobjekten zu anderen Änderungsobjekten aufgrund gemeinsamer Änderungen (durchschnittlicher Knotengrad von Änderungsobjekten aus der DSM).

Gegenüber globalen Strukturmerkmalen, die die gesamte Struktur beschreiben und häufig auf Durchschnittswerten beruhen, adressieren lokale Strukturmerkmale einzelne Knoten und Relationen, die sowohl gewichtet als auch ungewichtet sein können. Mit lokalen Strukturmerkmalen ist es möglich, einzelne Änderungen und Änderungsobjekte auf Basis ihrer Vernetzung zu identifizieren und zu bewerten. Dies ist für die Identifikation von konkreten Handlungsschwerpunkten zur Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen von besonderer Bedeutung.

Der **Knotengrad** eines Elements beschreibt, wie viele Elemente mit diesem verbunden sind:

- Anzahl erfolgter Änderungen am Änderungsobjekt (Knotengrad eines Änderungsobjekts).
- Anzahl an änderungsbedingten Relation zu weiteren Änderungsobjekten, da diese gemeinsam Teil eines Änderungsumfangs waren (Knotengrad eines Änderungsobjekts).

Der lokale **Cluster Koeffizient** bildet ab, wie stark die Nachbarn eines Elements untereinander in Beziehung stehen, indem der Quotient aus tatsächlichen Abhängigkeiten und möglichen Abhängigkeiten zwischen den benachbarten Elementen ermittelt wird:

- Struktur der lokalen Nachbarschaft eines Änderungsobjekts (Clustering Koeffizient eines Änderungsobjekts): Je höher der Clustering Koeffizient ist, desto wahrscheinlicher

ist es, dass eine Änderung an einem Änderungsobjekt zu einer Änderung des ganzen Clusters³² führt.

Die **Distanzzentralität** steht für die relative Distanz eines Elements zu den restlichen Elementen im Änderungsstrukturmodell:

- Die relative Position eines Änderungsobjekts in der Änderungsstruktur auf Basis der kürzesten Verbindungen: Je zentraler das Änderungsobjekt in der Struktur ist, desto geringer ist der Wert der Distanzzentralität und umso kürzer sind die Verbindungen zu den verbleibenden Änderungsobjekten. Dadurch können sich Änderungen „schneller“ zu jeglichen anderen Änderungsobjekten in der Änderungsstruktur ausbreiten.

Die **mittlere Distanz zu Elementen** gibt die durchschnittliche Pfadlänge zu allen Elementen im Strukturmodell an:

- Position eines Änderungsobjekts in der Änderungsstruktur auf Basis der durchschnittlichen Abhängigkeiten zu weiteren Änderungsobjekten: Die mittlere Distanz gibt Hinweise auf die Erreichbarkeit weiterer Änderungsobjekte durch eine Änderungsausbreitung.

Abbildung 6-11 verdeutlicht den Betrachtungsfokus der lokalen Strukturmerkmale in der Änderungsstruktur am Beispiel der Abhängigkeiten zwischen Änderungsobjekten.

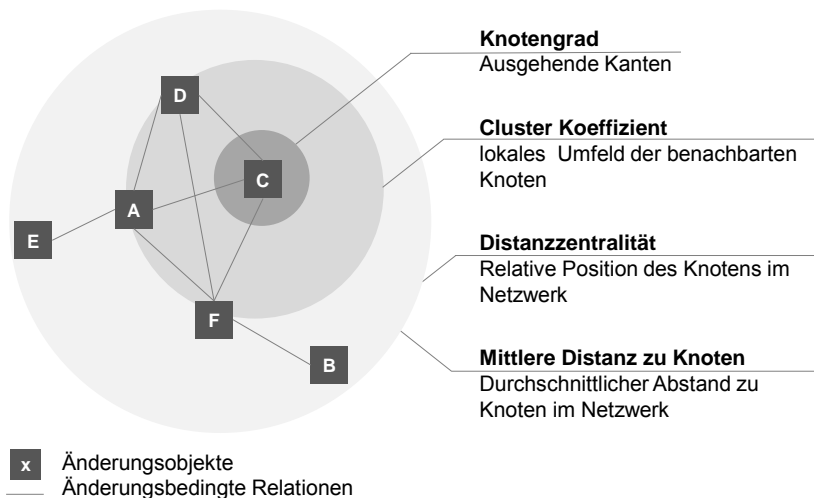


Abbildung 6-11: Betrachtungsumfang lokaler Strukturmerkmale am Beispiel von Änderungsobjekt C

Der Knotengrad betrachtet lediglich die Anzahl an Abhängigkeiten eines Änderungsobjekts. Der Cluster Koeffizient betrachtet, inwiefern das lokale Umfeld eines Änderungsobjekts in Beziehung steht, indem die änderungsbedingten Relationen zwischen verbundenen Änderungsobjekten betrachtet werden. Die Distanzzentralität und mittlere Distanz eines Änderungsobjekts bezieht sich auf die gesamte Änderungsstruktur. Es wird die Position des Änderungsobjekts zu

³² Ein Cluster stellt eine Teilstruktur mit vielen internen und wenigen externen Abhängigkeiten dar.

allen weiteren Änderungsobjekten, basierend auf der kürzesten Verbindung (Distanzzentralität) bzw. der mittleren Distanz zu Änderungsobjekten, bestimmt.

Strukturanalyse der Änderungsstruktur

Bezugnehmend auf das eingeführte Merkmalschema von Änderungen (vgl. Tabelle 6-1) können die erarbeiteten Strukturmerkmale zur Bewertung der Merkmale Häufigkeit und Änderungsausbreitung verwendet werden. Die beiden verbleibenden Merkmale Änderungstyp und Zeitpunkt werden, durch Änderungsattribute im Änderungsstrukturmodell berücksichtigt, da diese nicht über die Strukturmerkmale bewertet werden können.

Tabelle 6-4: Änderungsmerkmale und zugeordnete Strukturmerkmale mit Änderungsattributen

Merkmale	Strukturmerkmale/Änderungsattribute
Änderungstyp nach Ursache	- Nutzung des Änderungsattributs Ursache zur Differenzierung zwischen fehler-, neuerungs- und verbesserungsbedingten Änderungen
Zeitpunkt der Änderung	- Nutzung des Attributs Zeitpunkt der Änderung oder Meilensteine im Entwicklungsprojekt - Alternativ bspw. die letzten 20 % der Änderungen in der Entwicklung, als späte Änderungen klassifizieren
Änderungsausbreitung	- Knotengrad von Änderungsobjekten in der Systemstruktur (Änderungsobjekte-DSM) - Clustering Koeffizient von Änderungsobjekten - Distanzzentralität von Änderungsobjekten - mittlere Distanz eines Änderungsobjekts in der Änderungsstruktur
Häufigkeit	- Knotengrad Änderungsobjekte in der Änderungsstruktur (Änderungs-DMM)

Im Weiteren wird das Vorgehen zur Identifikation von vermeidbaren und vorzuverlagernden Änderungen unter Nutzung des Änderungsstrukturmodells, der Strukturmerkmale und Änderungsattribute beschrieben.

Identifikation der Handlungsschwerpunkte zur Vermeidung von Änderungen

Die Strategie der **Vermeidung** von technischen Änderungen (vgl. Kapitel 2.1.3) zielt darauf ab, Maßnahmen so einzuleiten, dass Änderungen mit hohen Auswirkungen erst gar nicht auftreten. Mit Hilfe der Strukturmerkmale können diese Änderungsschwerpunkte in der Produktstruktur identifiziert werden, die sich durch häufige Änderungen und eine hohe Änderungsausbreitungen auszeichnen.

Für die Ermittlung der Änderungsschwerpunkte werden die Änderungs-DMM und die daraus abgeleitete Änderungsobjekt-DSM aus dem Änderungsstrukturmodell verwendet. Es werden nur Änderungsobjekte und -relationen darin berücksichtigt, die auf einer fehlerbedingten Ursache beruhen, da diese im Allgemeinen als vermeidbar gelten. Auf Basis der ausgewählten DMM und DSM werden die Strukturmerkmale für die fehlerbedingten Änderungen berechnet,

um die Änderungsausbreitung und -häufigkeit zu ermitteln. Diese werden anschließend in einem Portfolio gegenübergestellt.

Das Portfolio in Abbildung 6-12 stellt den Zusammenhang zwischen Änderungshäufigkeit und Änderungsabhängigkeiten zu weiteren Objekten auf Basis von fehlerbedingten Änderungen dar. Die Position des Änderungsobjekts in der Änderungsstruktur wird über die Distanzzentralität eingebracht. Das abgebildete Beispiel verdeutlicht, dass Änderungsobjekt F besonders häufig geändert wird, sehr zentral in der Änderungsstruktur positioniert ist (vgl. Distanzzentralität) und zudem viele Abhängigkeiten zu weiteren Änderungsobjekten aufweist. Änderungsobjekt F eignet sich daher für die Strategie Vermeidung und sollte zudem hinsichtlich einer Reduktion der änderungsbedingten Abhängigkeiten untersucht werden, um die Änderungsausbreitung zu vermeiden.

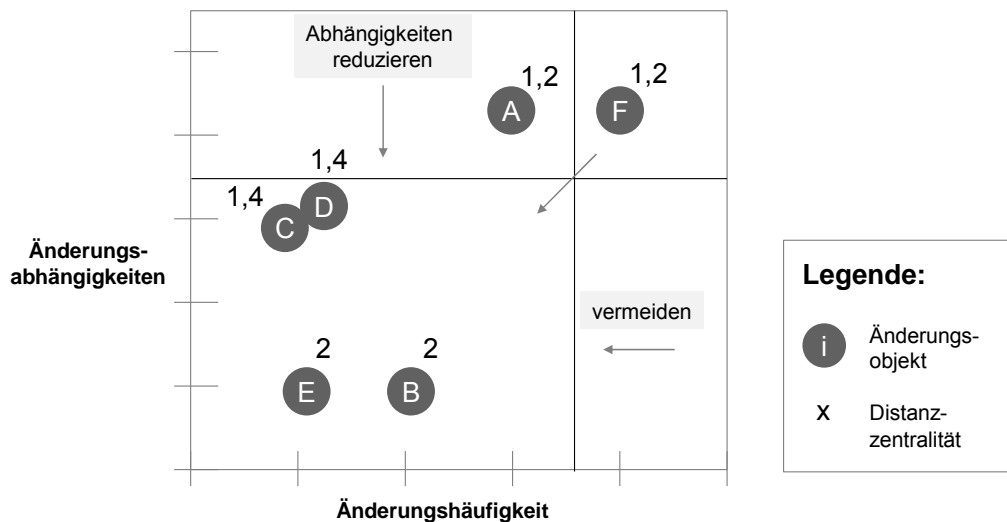


Abbildung 6-12: Portfolio zur Identifikation von Änderungsschwerpunkten in der Struktur

Identifikation der Handlungsfelder zur Vorverlagerung von Änderungen

Die Strategie der **Vorverlagerung** fokussiert in erster Linie verbesserungsbedingte Änderungen. Da es allerdings unrealistisch erscheint, dass alle fehlerbedingten Änderungen vermieden werden, sollten diese auch in der Strategie der Vorverlagerung berücksichtigt werden. Es sind demnach alle späten Änderungen in der Änderungs-DMM und resultierenden Änderungsobjekt-DSM zu berücksichtigen. Die Abbildung 6-13 zeigt einen idealisierten Änderungsverlauf, wie dieser mit und ohne Vorverlagerung verläuft.

Der Zeitpunkt, ab wann eine technische Änderung als spät einzustufen ist und vorverlagert werden sollte, ist von jedem Unternehmen individuell festzulegen und hängt stark vom Produkt und zugehörigen Entwicklungsprozess ab. Eine Orientierung an Meilensteinen des Entwicklungsprozesses ist hierbei empfehlenswert.

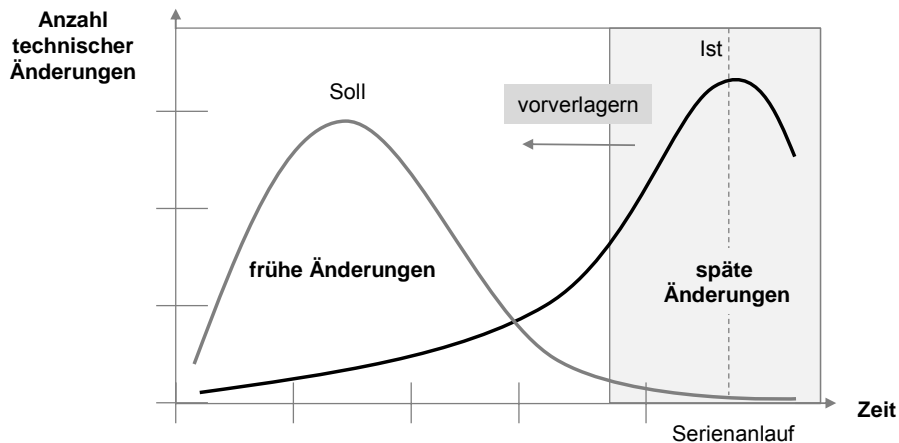


Abbildung 6-13: Vorverlagerung von späten Änderungen im Entwicklungsprozess

Unter Verwendung des Portfolios in Abbildung 6-14, wird die Änderungshäufigkeit den Änderungsabhängigkeiten eines Änderungsobjekts (über den Knotengrad) für späte Änderungen gegenübergestellt. Für Änderungsobjekte, die häufig spät geändert werden, empfiehlt sich stets die Strategie der Vorverlagerung. Dies gilt umso mehr, je höher die Änderung zur Ausbreitung neigt. Finden Änderungen an einem Änderungsobjekt kontinuierlich über den Entwicklungsprozess statt, so kann auch eine Bündelung von Änderungen sinnvoll sein, beispielsweise zu bestimmten Meilensteinen im Entwicklungsprozess. Bei stark vernetzten Änderungsobjekten, die häufig geändert werden, ist wiederum die Reduzierung der Änderungsausbreitung empfehlenswert.

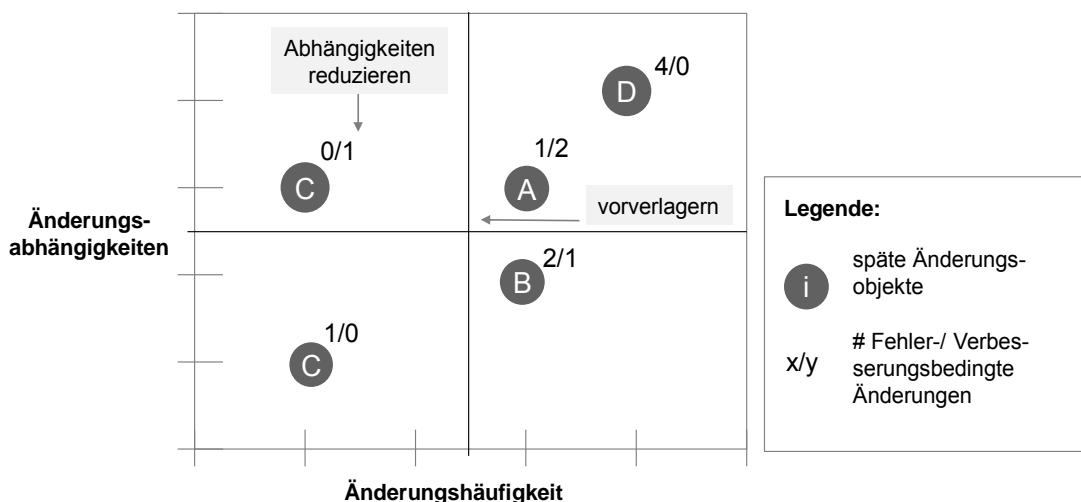


Abbildung 6-14: Portfolio zur Identifikation von Änderungsobjekten zur Vorverlagerung

Wurden relevante Änderungsschwerpunkte für eine Vermeidung, Vorverlagerung und Reduzierung der Änderungsausbreitung identifiziert, so sind diese im nächsten Schritt näher zu betrachten um relevante Maßnahmen abzuleiten sowie Handlungsschwerpunkte.

Maßnahmen zur Vermeidung von fehlerbedingten Änderungen

Um fehlerbedingte Änderungen zu **vermeiden** gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, die sich insbesondere auf die Vermeidung der jeweiligen Ursache beziehen. Für die Änderungsobjekte in den identifizierten Handlungsfeldern ist daher eine Ursachenanalyse durchzuführen, falls diese nicht bereits im Änderungsprozess stattgefunden hat.

Eine etablierte Methode für die Vermeidung von Fehlern und damit fehlerbedingten Änderungen stellt die FMEA dar. Sie nutzt Kenntnisse über häufige Fehler und Ursachen sowie deren Auswirkungen, um diese in neuen Entwicklungsprojekten hinsichtlich ihres Risikos zu bewerten und bei Bedarf Maßnahmen einzuleiten. Die FMEA wird grundsätzlich in frühen Phasen der Produktentwicklung durchgeführt und bewertet Fehler anhand folgender Kennzahlen (vgl. Reinhart et al. 1996, S. 86–91):

- B: Bedeutung hinsichtlich einer Fehlerfolge (mit $1 \leq B \leq 10$)
- A: Auftretenswahrscheinlichkeit (mit $1 \leq A \leq 10$)
- E: Entdeckungswahrscheinlichkeit (mit $1 \leq E \leq 10$)

Die FMEA eignet sich besonders zur Kombination mit der a posteriori Analyse, denn durch diese kann die Kennzahlenermittlung der FMEA über Strukturmerkmale vergangener Entwicklungsprojekte unterstützt werden. Diese sind zwar im Kontext der neuen Produktentwicklung in interdisziplinären Teams nochmals zu hinterfragen und zu diskutieren, stellen aber eine solide Ausgangsbasis dar, um wichtige Fehler und Zusammenhänge nicht zu übersehen.

Zur Bewertung der **Auftretenswahrscheinlichkeit A** eines Fehlers eignet sich die Betrachtung der Änderungshäufigkeit, die aus dem Knotengrad von Änderungsobjekten in der Änderungs-DMM berechnet wird. Zur Einschätzung der **Bedeutung einer Fehlerfolge B** wird unterstützend die Ausbreitung auf weitere Änderungsobjekte verwendet und daher auf die Strukturmerkmale zur Änderungsabhängigkeiten zurückgegriffen. Die Bewertung der **Entdeckungswahrscheinlichkeit E** wird unterstützt durch den Zeitpunkt bzw. der Phase im Entwicklungsprozess, in der die Änderung entdeckt wurde. Basierend auf diesen Kenngrößen können Maßnahmen eingeleitet werden, die entweder die Auftretenswahrscheinlichkeit reduzieren, die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Fehlern erhöhen oder die Bedeutung einer Fehlerfolge reduzieren.

Da Fehler häufig durch mangelnde Kommunikation oder Kollaboration entstehen, kann eine erweiterte Analyse bei der Definition von organisatorischen Maßnahmen unterstützen, die die Zusammenarbeit und Abstimmungen von Organisationseinheiten betreffen. Hierzu wird das Systemmodell um die Domäne der verantwortlichen Organisationseinheiten erweitert (s. Abbildung 6-15, linke Seite), um diejenigen Organisationseinheiten zu identifizieren, die häufig gemeinsam von fehlerbedingten Änderungen betroffen sind. Die Berechnung hierfür erfolgt über das Änderungsstrukturmodell (analog zur Berechnung der änderungsbedingten Produktabhängigkeiten in Kapitel 6.2.2). Die resultierende DSM und der Graph verdeutlichen (s. Abbildung 6-15, rechte Seite) welche Organisationseinheiten häufig gemeinsame bzw. organisationsübergreifende, fehlerbedingte Änderungen aufweisen.

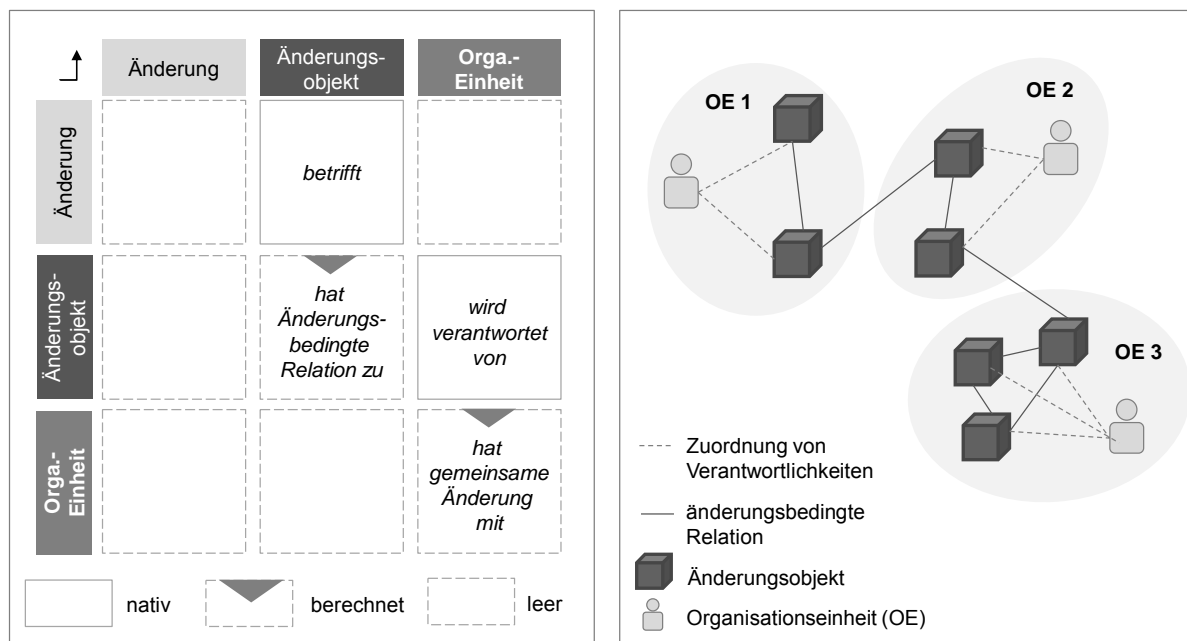


Abbildung 6-15: Änderungszusammenhänge in der Organisationsstruktur

Um die Anzahl der organisationsübergreifenden und fehlerbedingten Änderungen zu reduzieren, eignen sich im allgemeinen Maßnahmen zur Verbesserung der Kommunikation und Kollaboration, wie bspw. gemeinsame Workshops und Abstimmungstreffen oder gemeinsame Projekträume. Bevor im konkreten Fall Maßnahmen eingeleitet werden, sollte jedoch bestätigt sein, dass die Ursachen von fehlerbedingten Änderungen auf eine mangelnde Kommunikation und Kollaboration zurückzuführen ist und die vorgeschlagenen Maßnahmen hierfür zielführend sind.

Maßnahmen zur Vermeidung der Änderungsausbreitung

Die Änderungsabhängigkeiten führen dazu, dass Änderungen an einer Komponente zu Änderungen an weiteren Komponenten führen. Soll die Änderungsausbreitung eines spezifischen Änderungsobjekts reduziert werden, da es beispielsweise über die Portfolio-Analyse entdeckt wurde, unterstützt die Betrachtung der lokalen Struktur dieses Objekts³³. Die Analyse der lokalen Struktur hat die Aufgabe, lokale Cluster des Änderungsobjekts zu identifizieren sowie geeignete und effektive Relationen zur Vermeidung zu identifizieren.

Für Komponente F weist Abbildung 6-16 die lokale Abhängigkeitsstruktur auf, inklusive der Ausbreitungswahrscheinlichkeiten. Die lokale Struktur von Änderungsobjekt F gibt Hinweise auf ein Cluster, das die Änderungsobjekte A, D und C beinhaltet. Dieses Cluster sollte ganzheitlich betrachtet werden, um die Änderungsausbreitung effektiv zu reduzieren. Andernfalls können sich Änderungen jeweils über die verbleibenden Relationen ausbreiten. Im Unterschied

³³ In der sozialen Netzwerkanalyse wird dies als Ego-zentrierte Analyse bezeichnet.

dazu kann die Abhängigkeit zu Änderungsobjekt B einzeln betrachtet werden, da keine weiteren Abhängigkeiten zwischen benachbarten Änderungsobjekten vorliegen. Es sollten stets auch die Ausbreitungswahrscheinlichkeit herangezogen werden, da sich Änderungen über Relationen mit hohen Wahrscheinlichkeitswerten häufiger in der Änderungsstruktur ausbreiten.

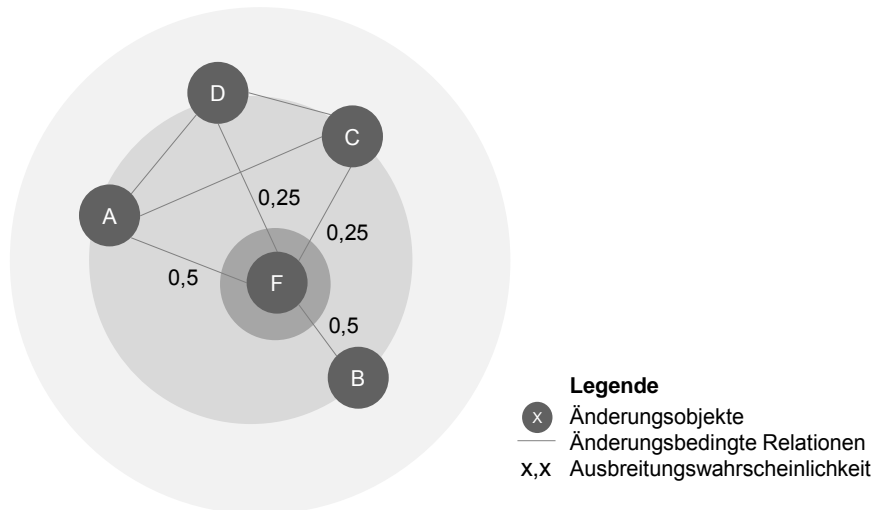


Abbildung 6-16: Lokale Struktur eines Änderungsobjekts

Zur Beeinflussung von Relationen zur Änderungsausbreitung, sind Kenntnisse über die zugrundeliegenden Ausbreitungsmechanismen notwendig. Diese sind häufig auf Abhängigkeiten innerhalb der Produktarchitektur zurückzuführen, können aber auch aus anderen Abhängigkeiten wie bspw. der Organisations- oder Produktionsstruktur sowie des Produktportfolios resultieren. Letztere Abhängigkeiten ergeben sich unter anderem aus der Anwendung von Baukastensystemen oder Plattformen.

Eine modulare Systemarchitektur mit physisch und funktional unabhängigen Systemelementen reduziert Abhängigkeiten innerhalb der Produktstruktur (Feldhusen et al. 2012a, S. 259). Technische Änderungen sind in modularen Systemarchitekturen einfacher umzusetzen, da sich die Änderungsausbreitung auf das spezifische Modul beschränkt (Orton & Weick 1990, S. 205). Die Produktarchitektur sollte daher so gestaltet sein, dass der Großteil an Änderungen nur zu geringen Anpassungen führt (Martin & Ishii 2002, S. 214). Eine Voraussetzung hierzu sind entkoppelte Schnittstellen zwischen Modulen.

Die retrospektive Analyse der Änderungsausbreitung ermöglicht es, modulare Produktstrukturen hinsichtlich ihrer modularen Unabhängigkeit zu bewerten. Eine gute Modularisierung liegt demnach vor, wenn eine hohe änderungsbedingte Abhängigkeit innerhalb von Modulen auftritt und eine geringe Abhängigkeit zu weiteren Modulen. Diese Relationen werden als sogenannte intra-Modul- bzw. inter-Modul-Relationen bezeichnet.

Durch eine Erweiterung des Änderungsstrukturmodells um die Modulstruktur, die Änderungsobjekte und deren Modulzuordnung umfasst, können intra- und inter-Modul-Relationen ermittelt werden. Abbildung 6-17 zeigt das erweiterte Systemmodell in Form einer MDM mit den Domänen Änderungen, Änderungsobjekte und Module. Über eine Datentransformation, die in

Kapitel 6.2.2 beschrieben ist, kann eine DMM erzeugt werden, die die Abhängigkeiten zwischen Änderungen und Modulen beschreibt. Aus dieser normierten DMM können schließlich die änderungsbedingten Abhängigkeiten zwischen Modulen berechnet werden (s. Kapitel 6.2.2). Die resultierende DSM zeigt, zwischen welchen Modulen änderungsbedingte Abhängigkeiten vorliegen und damit Potenzial für eine Verbesserung der Produktarchitektur aufweisen. Ein Kennwert für die Qualität der Modulbildungen stellt das Verhältnis zwischen intra- zu inter-Modul-Relationen dar.

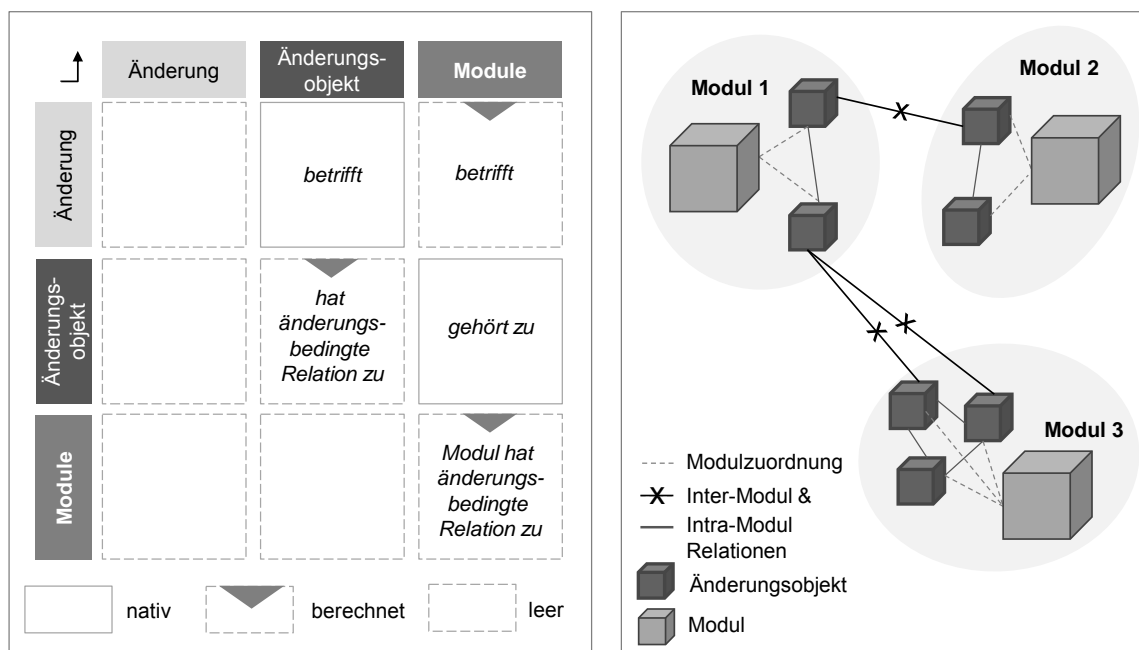


Abbildung 6-17: Änderungszusammenhänge in der Produktstruktur

Abhängigkeiten in der Produktstruktur können über eine Standardisierung von Schnittstellen aufgelöst werden, wodurch Module entkoppelt werden (Lindemann et al. 2009) und Änderungen sich nicht mehr über diese ausbreiten. Eine Standardisierung von wenigen Schnittstellen führt bereits zu einer erhöhten Unabhängigkeit von Elementen in der Produktstruktur und reduziert indirekte Abhängigkeiten und Kreisschlüsse (Lindemann et al. 2005, S. 68). Da die Generierung von definierten Schnittstellen natürlich mit Aufwand verbunden ist, sollte situativ bewertet werden, ob die Einführung einer standardisierten Schnittstelle wirtschaftlich ist.

Eine weitere Möglichkeit ist die bewusste Gestaltung von Schnittstellen, so dass diese gegenüber Änderungen an Sensibilität verlieren. Kleine Anpassungen führen dann innerhalb eines definierten Bereichs nicht zwangsläufig zu einer Änderung an weiteren Komponenten. Ansätze hierfür finden sich im Toleranzmanagement, indem Toleranzen gezielt aufgeweitet werden, um eine größere Robustheit gegenüber Änderungen zu erlangen.

Maßnahmen zur Vorverlagerung von Änderungen³⁴

Die Strategie **Vorverlagerung** von Änderungen nutzt Maßnahmen, mit denen Änderungen früher im Entwicklungsprozess identifiziert werden können. Für die frühe Identifikation von Änderungsbedarfen eignen sich Methoden der Eigenschaftsabsicherung und des Anforderungsmanagements.

In der Literatur stehen hierfür viele Methoden bereit. Je nachdem welche Eigenschaft abgesichert werden soll, in welchem Entwicklungsstatus sich das Produkt befindet und welche Informationen vorliegen, sind unterschiedliche Methoden einsetzbar. Für die frühe Absicherung von Kundenerwartungen eignen sich bspw. physische und digitale Prototypen.

Die Strukturmerkmale unterstützen die Auswahl der Änderungsobjekte, die im Sinne der Effektivität fokussiert werden sollten. Da Methoden zur frühen Identifikation von Änderungsbedarfen häufig mit einem erheblichen Aufwand einhergehen, sind diese in Bezug zum erwarteten Nutzen und Risiko abzuwägen. Für die Terminierung des Methodeneinsatzes empfiehlt es sich daher die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Änderung, die erwarteten Auswirkungen sowie den Aufwand für die Methode zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Entwicklungsprozess gegenüberzustellen (vgl. Abbildung 6-18). Dadurch ist es möglich einen kostengünstigen und risikooptimierten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess festzulegen (vgl. Wickel et al. 2013a).

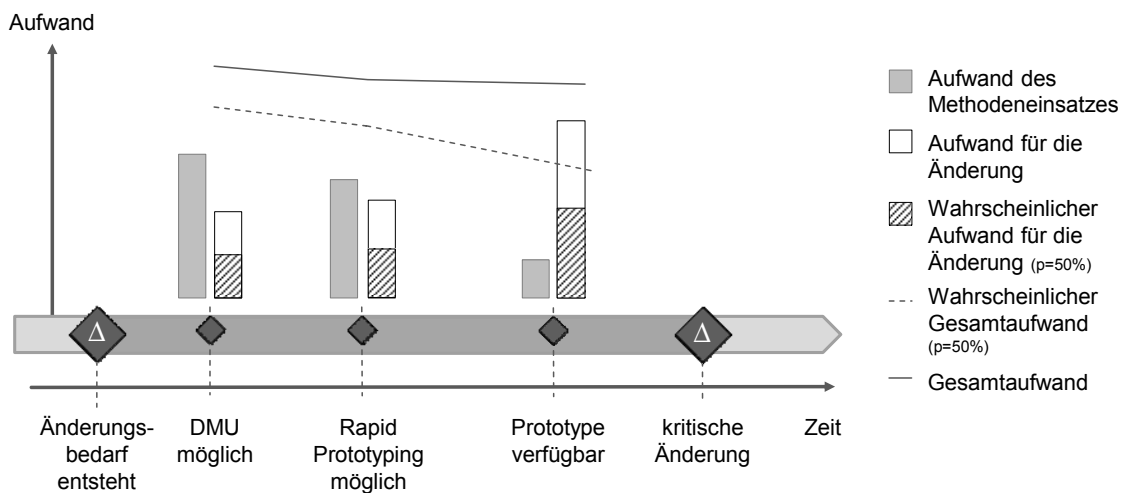


Abbildung 6-18: Terminierung des Methodeneinsatzes zur Änderungsidentifikation nach Wickel et al. (2013a)

³⁴ Dieses Kapitel beruht auf der Vorveröffentlichung Wickel et al. (2013a).

Zwischenfazit

Prinzipiell liefert die a posteriori Analyse eine Auswahl an Änderungsobjekten, die sich aufgrund ihres hohen Einflusses im Änderungsstrukturmodell für die Strategien Vermeidung und Vorverlagerung, eignen. Dadurch werden zielgerichtete Diskussionen von Änderungsschwerpunkten ermöglicht die zu Handlungsfeldern führen können. Zudem wird die Auswahl möglicher Maßnahmen zur Vorverlagerung und Vermeidung von Änderungen unterstützt. Die Entscheidung, welche Änderungen tatsächlich vermieden oder vorverlagert werden sollten, ist allerdings nur mit dem Erfahrungswissen von Experten und im Kontext des neuen Entwicklungsprojekts möglich. Die Maßnahmenauswahl ist zudem davon bestimmt, welche Ressourcen bspw. zur Eigenschaftsabsicherung im Unternehmen vorhanden sind.

6.4 Baustein 3: A priori Analyse der Änderungsausbreitung

In der a priori Analyse wird das Änderungsstrukturmodell (vgl. Kapitel 6.2) verwendet um für eine vorliegende Änderung mögliche Ausbreitungen in der Produktstruktur aufzuzeigen. Dabei werden statistische Maßzahlen aus der Assoziationsanalyse verwendet. Damit unterstützt Baustein 3 die Vorhersage der Änderungsausbreitung innerhalb der Produktstruktur.

6.4.1 Anwendungsgebiet der a priori Analyse

Der Änderungsprozess gilt in der Produktentwicklung als ein Entscheidungsprozess, der dazu dient, Informationen über eine technische Änderung zu sammeln, um anschließend über diese zu entscheiden (Langlotz 2011). Er wird umso schwieriger zu managen, je komplexer die Organisation und das Produkt ist (Riviere et al. 2013, S. 6).

Der VDA Änderungsmanagement-Referenzprozess, der als Standardprozess in der Automobilbranche gilt, schlägt folgende Phasen vor (vgl. Kapitel 2.2.1):

- Identifikation des Änderungsbedarfs
- Entwicklung von alternativen Lösungen
- Detaillierung und Entscheidung über die Änderung
- Implementierung der Änderung in der Entwicklung
- Implementierung der Änderung in der Produktion

Die dritte Phase der „Detaillierung und Entscheidung über die Änderung“ ist besonders wichtig für die Effektivität des Prozesses, da in dieser Phase über die Änderung entschieden wird. Größere Unternehmen setzen hierzu einen Änderungskoordinator ein, der, beginnend mit dieser Phase, verantwortlich für die Umsetzung der Änderung ist.

In der dritten Phase wird der Änderungsantrag erstellt, die Änderung ist somit im Änderungsmanagementsystem und wird erstmals dokumentiert, klassifiziert und priorisiert. Der Änderungskoordinator hat nun die Aufgabe, alle relevanten Unternehmensbereiche und Mitarbeiter in den Änderungsprozess einzubinden, damit diese die Änderungsauswirkungen in ihrem Unternehmensbereich abschätzen.

Damit der Änderungskoordinator jedoch die richtigen Unternehmensbereiche und Mitarbeiter in den Änderungsprozess involvieren kann, benötigt er Wissen über änderungsbedingte Produkt- und Prozesszusammenhänge. Ausgehend vom Änderungsvorschlag ist es seine Aufgabe, betroffene Produktkomponenten, Prozesse und Dokumente zu identifizieren, um die dafür verantwortlichen Mitarbeiter in die technische Analyse einzubeziehen. Fehlt dem Änderungskoordinator Wissen über diese Zusammenhänge, werden möglicherweise nicht alle benötigten Mitarbeiter über die Änderung informiert und zur Auswirkungsanalyse aufgefordert. Dadurch werden Änderungsauswirkungen möglicherweise nicht vollständig berücksichtigt, was unter Umständen zu erheblichen und kostenintensiven Fehlentscheidungen führt. Es ist auch möglich, dass von der Änderung betroffene Bauteile erst später im Änderungsprozess erkannt werden, wodurch unnötige Iterationen entstehen, da erneut alle von der Änderung betroffenen Bereiche informiert werden müssen.

Durch die Bereitstellung von Änderungsabhängigkeiten aus vergangenen Entwicklungsprojekten wird der Änderungskoordinator bei der Bestimmung der betroffenen Produktkomponenten unterstützt. Die quantifizierten Zusammenhänge erlauben ihm zudem, die Wahrscheinlichkeit der Änderungsausbreitung auf der Basis von Vergangenheitsdaten abzuschätzen. Besonders bei komplexen Produkten ist die Bestimmung der änderungsbedingten Zusammenhänge aufgrund der vielen, oft auch versteckten Abhängigkeiten nicht trivial. Eine einzelne Person besitzt in der Regel das dazu erforderliche Wissen nicht und ist somit nicht in der Lage, sämtliche Auswirkungen eines Änderungsvorschlags innerhalb eines komplexen Produkts abzuschätzen.

Durch die Nutzung der änderungsbedingten Abhängigkeiten in der Produktstruktur wird der Änderungskoordinator bei der Auswahl der zu involvierenden Unternehmensbereiche und Mitarbeiter unterstützt, wodurch die Effizienz und Effektivität im Änderungsprozess verbessert wird. Analog zur Checkliste kann der Änderungskoordinator die auf Basis der a priori Analysen vorgeschlagenen und relevanten Abhängigkeiten zu weiteren Änderungsobjekten prüfen und im Kontext der vorgeschlagenen Änderung und des Entwicklungsprojekts bewerten. Auf diese Weise übersieht oder vergisst der Änderungskoordinator weniger Auswirkungen und es kommt zu weniger Iterationen im Änderungsprozess.

6.4.2 A priori Analyse der Änderungsausbreitung

Ziel dieses Konzepts ist es, dem Änderungskoordinator Zusammenhänge vergangener Änderungsobjekte direkt im Workflow-System aufzuzeigen³⁵. Hierbei sollen die bereits getätigten spezifischen Eingaben, die die vorliegende Änderung und deren Kontext näher charakterisieren, berücksichtigt werden. Basierend auf diesen Eingaben werden passende Vorschläge unterbreitet, bspw. für betroffene Bauteile oder zu informierende Unternehmensbereiche und Mitarbeiter. Dieses Verfahren ist bekannt aus dem Onlinehandel, wo umfangreiche Analysen von Warenkörben stattfinden, um Nutzern interessante Empfehlungen für weitere Produkte vorzuschlagen (vgl. auch Kapitel 3.2). In Abbildung 6-19 ist eine mögliche Ansicht eines Workflow-

³⁵ Die Beschreibung des Konzepts ist an die Vorveröffentlichung Wickel & Lindemann (2015b) angelehnt.

Systems für technische Änderungen mit integriertem Empfehlungssystem dargestellt. Die Eingaben orientieren sich an dem VDA Änderungsmanagement-Referenzprozess für technische Änderungen.

Spezifikation der Änderung und Entscheidung




△	ID Änderung <<auto>> Beschreibung _____ Ursache _____ Begründung _____	Welche Systemelemente sind ggf. noch betroffen?  <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-top: 5px;"> + In 30 % der Änderungen an diesem Bauteil war auch Bauteil B betroffen. Möchten Sie den Verantwortlichen informieren? </div>
□	ID Produkt _____ ID Bauteil _____ Phase <<auto>> Änderungsart _____	Wer sollte noch über die Änderung informiert werden?  <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-top: 5px;"> + In 80 % der Änderungen an diesem Bauteil wurde die Produktionsplanung informiert! Möchten Sie diese informieren? </div>
○	ID Antragsteller <<auto>> ID Abteilung <<auto>> Kunde _____ Auswirkung _____	Zu ähnlichen Änderungen wurden Lessons Learned verfasst:  <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin-top: 5px;"> + </div>

Abbildung 6-19: Empfehlungssystem zur Erstellung des Änderungsantrags (linke Seite: Eingabefelder; rechte Seite: Systembasierte Empfehlungen basierend auf diesen) nach Wickel & Lindemann (2015b)

Auf der linken Seite der Abbildung 6-19 befinden sich die vom Änderungskoordinator getätigten Eingaben sowie Informationen, die durch relationale Datenbanken bereitgestellt werden. Basierend auf diesen Eingaben und der a priori Analyse werden auf der rechten Seite Vorschläge unterbreitet, die bei diesen Eingaben in der Vergangenheit häufig auch noch eingetreten sind. Hierbei handelt es sich bspw. um weitere geänderte Bauteile oder zu informierende Mitarbeiter und Unternehmensbereiche. Um ein solches Empfehlungssystem aufzubauen, sind die in Abbildung 6-20 dargestellten Aspekte zu definieren.

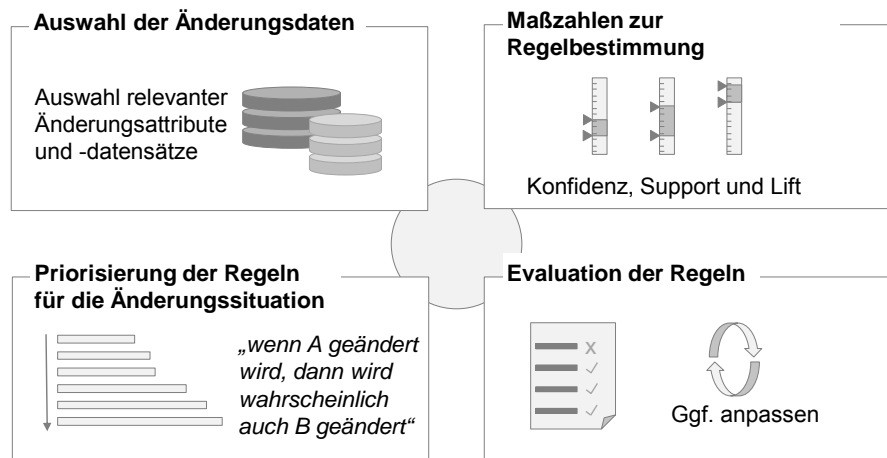


Abbildung 6-20: Aspekte für ein Empfehlungssystem im Änderungsmanagement

Das Vorgehen zur Definition des Empfehlungssystems ist aufgrund der Abhängigkeiten zwischen ausgewählten Änderungsdaten, minimalen Konfidenz- und Supportwerten zur Regelbestimmung und der Priorisierung der Regeln iterativ. Die Evaluation der Regeln überprüft schließlich die Vorhersagegüte des Empfehlungssystems. Im Folgenden werden die vier Aspekte für das Empfehlungssystem vorgestellt.

Auswahl der Änderungsdaten zur Assoziationsanalyse

Für die Assoziationsanalyse werden Änderungsdaten verwendet, die in früheren Änderungsprozessen erfasst und dokumentiert wurden. Das Entwicklungsprojekt oder die Entwicklungsprojekte, aus denen die Regeln generiert werden, sollten wie auch bei der a posteriori Analyse ähnlich zu dem Entwicklungsprojekt sein, in dem die Änderungsregeln genutzt werden. Denn nur in diesem Fall können die identifizierten Regeln sinnvoll wiederverwendet werden.

Die Änderungsdaten für die Assoziationsanalyse beinhalten neben Änderungsnummern mindestens die Änderungsobjekte (bspw. Baugruppen, Bauteile und Dokumente). Das Hinzufügen von Änderungseigenschaften, wie bspw. Grund, Zeitpunkt oder Auslöser von Änderungen, kann die Aussagekraft der Regeln verbessern, indem spezifischere Zusammenhänge abgeleitet werden können. Es sollte vom Entwicklungs- und Änderungsmanagement abgeschätzt werden, welche Änderungseigenschaften einen Einfluss auf die Abhängigkeiten zwischen Änderungsobjekten haben und demnach ergänzend einbezogen werden sollten. Welchen Einfluss die Auswahl der Änderungsdaten auf die Regeln hat, wird in folgendem Beispiel für einen Motor dargestellt. Regel 1 beruht auf einen Änderungsdatensatz der nur Änderungsobjekte beinhaltet. Regel 2 beinhaltet Änderungsobjekte und -eigenschaften:

- Regel 1: Bei einer Änderung der Kolbenringe wurde in 80 % der Fälle in der Vergangenheit auch der Kolben verändert.
- Regel 2: Bei einer Änderung der Kolbenringe hinsichtlich ihrer Geometrie wurde in 95 % der Fälle auch der Kolben geändert.

Prinzipiell können alle Attribute eines Änderungsdatensatzes sowie die erfassten Änderungsprozessdaten für die Regelerzeugung verwendet werden. In dieser Arbeit werden jedoch nur die änderungsbedingten Produktzusammenhänge berücksichtigt, die durch Änderungsattribute spezifiziert werden und zu Änderungsausbreitungen in der Produktstruktur führen.

In Tabelle 6-5 sind typische Änderungsdaten dargestellt, wie diese in der industriellen Praxis in der Regel verfügbar sind (vgl. Kapitel 2.3).

Tabelle 6-5: Verfügbare strukturierte Änderungs- und Änderungsprozessdaten

	Änderungseigenschaften	Umfang der Änderung
Änderungsdaten	Änderungsnummer (ID)	Baugruppen
	Grund der Änderung	Bauteile
	Auslöser	Dokumente (z. B. Zeichnung)
	Status	Software
	Zeitpunkt	Prozesse, Aktivitäten z. B. Versuche
	Entwicklungsprojekt (ID)	Dienstleistungen

Über eine Einbindung der Änderungseigenschaften werden Regeln spezifischer. Durch eine Berücksichtigung eines größeren Umfangs (bspw. Bauteile, Software und Dienstleistungen) werden die Regeln erweitert, indem Änderungsausbreitungen auch diese betreffen können.

Maßzahlen zur Regelbestimmung festlegen

Die Empfehlungen, die dem Änderungskoordinator vorgeschlagen werden, basieren auf starken Regeln, die im Rahmen der Assoziationsanalyse (vgl. Kapitel 3.2) gewonnen werden. Regeln bestehen hierbei immer aus einer Prämisse X und Konklusion Y , deren Zusammenhang ($X \rightarrow Y$) über Maßzahlen beschrieben wird. Der minimale Grenzwert für die Maßzahlen Support, Konfidenz und Lift bestimmt die Regeln in einer Datenbasis. Erste wenn ein Zusammenhang mit einer bestimmten Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit in den Änderungsdaten auftritt ist er auch eine Regel. Beispielsweise können Regeln ermittelt werden, die für mehr als 90 % der gegebenen Daten gültig sind. Dies hat zur Folge, dass bei einer Assoziationsregel im Gegensatz zu einer echten Implikation die Vorhersage nicht zwingend richtig ist.

Das Festlegen der minimalen Grenzwerte der Maßzahlen bestimmt sowohl die Anzahl der erzeugten Regeln als auch die Vorhersagegüte. Es sind schließlich die Grenzwerte so festzulegen, dass Regeln mit einer gewissen Vorhersagegüte gefunden werden und damit hilfreiche Empfehlungen für den Änderungskoordinator bereitstellen.

Der **Support** gibt an, mit welcher relativen Häufigkeit Elemente gemeinsam in der Änderungsdatenbank auftreten müssen. Diese Maßzahl repräsentiert damit den Anteil innerhalb der Datenbasis, für den Prämisse und Konklusion übereinstimmen. Da der Support mit der statistischen Signifikanz korrespondiert, gibt er Aufschluss über die Bedeutsamkeit einer Regel. Zudem unterstützt der Support die Gegebenheit, dass üblicherweise Regeln relevant sind, die häufig auftreten. Für die Suche nach starken und relevanten Regeln wird ein minimaler Sup-

port³⁶ festgelegt, den ein Zusammenhang überschreiten muss. Um allerdings auch neue Erkenntnisse zu generieren, sollte dieser Wert nicht zu hoch angesetzt werden, so dass auch seltener auftretende Zusammenhänge in der Datenbasis identifiziert werden.

Für alle Zusammenhänge, die den minimalen Support erfüllen, wird die Maßzahl **Konfidenz**³⁷ berechnet. Diese gibt die relative Häufigkeit an, mit welcher bei Vorliegen einer Prämisse auch die Konklusion eintritt, bspw. wie häufig eine Änderung am Kolbenring (Prämisse) auch eine Änderung des Kolbens (Konklusion) involviert. Hierzu wird die Anzahl der regelerfüllenden Datensätze (z. B. Heizelement und Düse liegen gemeinsam in einer Änderung vor) mit der Anzahl der Datensätze, bei denen nur die Prämisse zutrifft (z. B. Heizelement ist Umfang der Änderung) ins Verhältnis gesetzt. Interpretiert wird der Konfidenz als die Stärke einer Regel.

Die Maßzahl **Lift** beschreibt das Verhältnis von Konfidenz zum Erwartungswert einer Regel. Damit wird bewertet, ob es sich bei der vorliegenden Regel nur um einen zufälligen Zusammenhang handelt, oder ob die Regel stochastisch unabhängig ist. Letzteres liegt vor, wenn die Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens von Prämisse und Konklusion höher ist als das Produkt aus den Einzelwahrscheinlichkeiten von Prämisse und Konklusion in der Datenbasis. Regeln mit einem Lift > 1 sind gegenüber anderen Regeln vorzuziehen.

Priorisierung bei der Empfehlung von Änderungsregeln

Da durch die Assoziationsanalyse unter Umständen eine Vielzahl an Regeln entstehen, die für einen Änderungsfall relevant sind, werden diese sortiert und in eine priorisierte Reihenfolge gebracht. Dabei bleiben alle erzeugten Regeln bestehen, die den minimalen Support übersteigen. Folgende Kriterien werden für die Priorisierung der Regeln verwendet:

- Kongruenz der Regel
- Lift
- Konfidenz

Die *Kongruenz* bestimmt zunächst, wie viele Elemente des Änderungsantrags in der Prämisse berücksichtigt werden. Hierbei gilt, je mehr Elemente enthalten sind, desto spezifischer ist die Regel und desto höher wird diese gegenüber den verbleibenden Regeln priorisiert.

Die Maßzahl *Lift* repräsentiert die statistische Signifikanz einer Regel und erlaubt eine Priorisierung nach seltener auftretenden Zusammenhängen. Häufig sind gerade diese Zusammenhänge, die seltener auftreten, die leicht übersehen oder vergessen werden können und deren Berücksichtigung einen Mehrwert darstellt.

Abschließend steht der *Konfidenz* für die Sortierung der Regeln bereit. Je höher dieser ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit eines gemeinsamen Auftretens der Änderungsobjekte in einem Änderungsantrag.

Die Priorisierungsfolge kann von jedem Unternehmen und Mitarbeiter individuell vorgenommen werden. Es empfiehlt sich zuerst nach der Kongruenz der Regeln und anschließend nach

³⁶ Der minimale Support ist von jedem Unternehmen individuell und in einem iterativen Vorgehen festzulegen. Als Startwert hat sich ein Support von 0,005 bewährt (vgl. Kapitel 7).

³⁷ Für den minimalen Konfidenz hat sich ein Startwert von 0,8 oder 0,9 bewährt (vgl. Kapitel 7).

dem Lift oder Konfidenz zur priorisieren, je nachdem ob bevorzugt starke bzw. seltenere Zusammenhänge vorgeschlagen werden sollen. Die nachfolgende Evaluation der Regeln unterstützt die Prüfung hinsichtlich einer angemessenen Priorisierung.

Evaluation der Regeln

Im Schritt der Evaluation wird überprüft, ob die erzeugten Regeln gute Vorhersagen erzielen, oder ob Anpassungen an den zuvor ausgewählten Änderungsdaten, festgelegten Grenzwerten für Support und Konfidenz oder der Priorisierung vorgenommen werden sollten. Die Evaluation sollte idealerweise datenbasiert vorgenommen werden. Das hat den Vorteil, dass die Maßzahlen für die Regelbildung mathematisch optimiert werden können und eine quantitative Evaluation der Vorhersagegüte erreicht wird. Hierfür eignen sich Daten aus ähnlichen Entwicklungsprojekten oder alternativ der Datensatz, aus dem die Änderungsregeln gewonnen wurden. Für letztgenannte Option wird die Hälfte der Daten zur Regelgenerierung und die verbleibenden Daten zur Evaluation und Regeloptimierung verwendet. Allerdings reduzieren sich dadurch die für die Regelgenerierung zur Verfügung stehende Datenbasis und damit die Regelqualität.

Für die datenbasierte Evaluation werden die erzeugten Regeln, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, anhand von realen Änderungsdaten getestet und deren Vorhersagegüte hinsichtlich der folgenden vier Fälle bewertet:

1. **True positive (tp)**: Eine Prämisse liegt vor und die Konklusion tritt ein.
2. **False negative (fp)**: Eine Prämisse liegt nicht vor und die Konklusion tritt ein.
3. **False positive (fn)**: Eine Prämisse liegt vor und die Konklusion tritt nicht ein.
4. **True negative (tn)**: Eine Prämisse liegt nicht vor und die Konklusion tritt nicht ein.

Aus den Häufigkeiten der Fälle kann auf die Vorhersagegüte geschlossen werden. Regeln sind umso besser, je häufiger richtige Vorhersagen (tp+tn) bei gleichzeitig möglichst wenigen falschen Vorhersagen (fp+fn) getroffen werden (Jain & Kabra 2012, S. 284). Folgende Kennwerte unterstützen hierbei die Bewertung der Änderungsregeln (vgl. Powers 2011):

Die **true-positive-Rate (TPR)**, auch als Sensitivität bekannt, beschreibt hierbei das Verhältnis der richtigen Regelanwendungen zur Gesamtanzahl der tatsächlich möglichen Regelanwendungen aufgrund des Vorliegens einer Prämisse.

$$\text{true-positive-Rate} = \frac{tp}{tp+fn} \quad \text{Formel 6-9}$$

Die **false-positive-Rate (FPR)** beschreibt das Verhältnis von Änderungen, in denen eine Konklusion eintritt ohne dass eine Prämisse vorliegt, zu all jenen, in denen keine Prämisse vorliegt.

$$\text{false-positive-Rate} = \frac{fp}{tn+fp} \quad \text{Formel 6-10}$$

Die **Relevanz**, auch als „**PPV** - positiv predictive value“ bekannt, gibt das Verhältnis von richtiger Regelanwendung zur Gesamtanzahl an Änderungen, in denen eine Konklusion aufgetreten ist, an.

$$\text{Relevanz} = \frac{tp}{tp+fp} \quad \text{Formel 6-11}$$

Die **Richtigkeit** (im Englischen auch als „**ACC** – accuracy“ bekannt) repräsentiert den Anteil an Änderungen mit einer richtigen Regelanwendung im Verhältnis zu allen Änderungen.

$$\text{Richtigkeit} = \frac{tp+tn}{tp+fp+tn+fn} \quad \text{Formel 6-12}$$

Die **Spezifität**, auch als Inverse Recall bekannt, gibt den Anteil der Änderungen, in denen weder Prämisse noch Konklusion einer Änderungsregel entsprechen, in Bezug zur Gesamtanzahl an Änderungen, in denen die Prämisse nicht auftritt, an.

$$\text{Spezifität} = \frac{tn}{tn+fp} \quad \text{Formel 6-13}$$

Zur Optimierung der Änderungsregeln empfiehlt sich die Receiver-Operating-Characteristic-Analyse (ROC-Analyse), die laut Powers (2011, S. 46) zur Optimierung der Maßzahlen der Assoziationsanalyse geeignet ist. In der ROC-Analyse werden für verschiedene Werte von Konfidenz und Support die false-positive-Rate auf der Abszisse und die true-positive-Rate auf der Ordinate aufgetragen (s. Abbildung 6-21). Prinzipiell finden sich die Änderungsregeln mit den besten Vorhersageergebnissen in der linken oberen Ecke des Diagramms wieder, wohingegen die schlechten Regeln in der rechten unteren Ecke auftreten. Zufällige Regeln befinden sich entlang der Diagonalen. Anhand des Diagramms können die optimalen Werte für Konfidenz und Support gewählt werden.

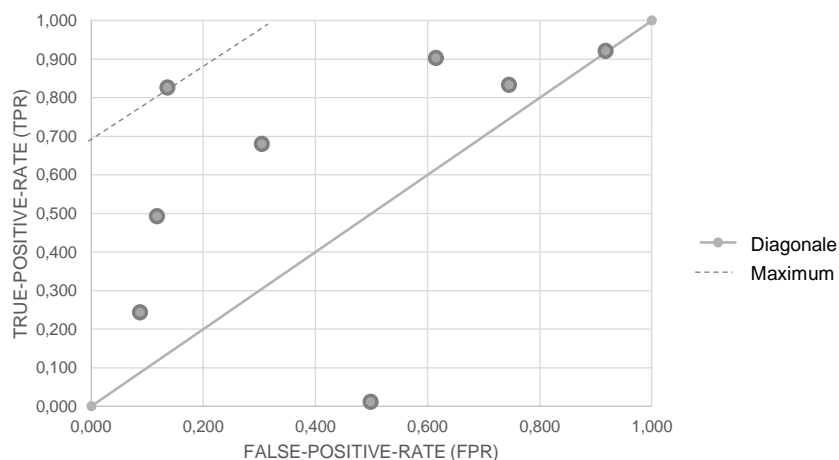


Abbildung 6-21: ROC Diagramm zur datenbasierten Regeloptimierung

Wird trotz Optimierung der Wert für den Konfidenz und Support keine ausreichende Vorhersagegüte erzielt, so ist zu überprüfen, ob der Regelbildung die richtigen Änderungsdaten zugrunde gelegt wurden. Unter Umständen sind aber auch die gewählten Entwicklungsprojekte und zu entwickelnden technischen Produkte nicht ähnlich genug, so dass Änderungsregeln nicht wiederverwendet werden können.

Werden die erzeugten Änderungsregeln nicht ausreichend priorisiert und relevante Regeln auf hinteren Positionen der priorisierten Liste gereiht, so sollte die zugrundeliegende Priorisierung nach Kongruenz, Lift und Konfidenz verändert werden. Unter Umständen ist die Priorisierung auch für unterschiedlich erfahrene Änderungskoordinatoren differenziert festzulegen, so dass

bspw. erfahrenen Mitarbeitern leicht zu übersehende Sonderfälle und Novizen alle regelbasierten Zusammenhänge angezeigt werden.

Technische Umsetzung

Die erzeugten Regeln sollen dem Nutzer basierend auf seinen zuvor getätigten Eingaben direkt im Workflow-System vorgeschlagen werden. Dadurch muss dieser nicht zwischen verschiedenen Informationssystemen wechseln und die relevanten Informationen zur Änderungsausbreitung in vergangenen Änderungsdaten suchen. Auf diese Weise kann die Zeit für eine Informationssuche reduziert werden, die bei Entwicklungstätigkeiten bis zu 50 % der Tätigkeit vereinnahmen kann (Yang et al. 2005, S. 177). Die vereinfachte, selektierte und aggregierte Darstellung der Informationen über mögliche Änderungsausbreitungen sowie eine visuelle Unterstützung in Form von Graphen vermeidet eine Informationsüberflutung, die zu ineffizienten Arbeitsabläufen, verzögerten Entscheidungen oder gar zur Nichtberücksichtigung von Informationen im Prozess führen kann (Eppler & Mengis 2008, S. 285–289).

Für die technische Ausgestaltung eines Empfehlungssystems wurde im Rahmen eines interdisziplinären Projektes (vgl. Kapitel 9.3) am Lehrstuhl für Produktentwicklung ein erster Prototyp erarbeitet. Dieser besteht aus einem Datenbanksystem mit implementiertem a priori Algorithmus zur Berechnung der Assoziationsregeln sowie einem Webserver. Der Webserver führt das eigentliche Empfehlungssystem aus und stellt eine Benutzerschnittstelle dar, in der sowohl Eingaben als auch Ausgaben erfolgen. Ebenso können die Werte für die Maßzahlen (Konfidenz, Support oder Lift) darin definiert werden.

Zur Berücksichtigung der Datenaktualität bestehen zwei Alternativen. Es kann für jede Eingabe eine Empfehlung auf Basis der aktuellen Daten berechnet werden. Dies kann allerdings in Abhängigkeit des Datenumfangs zu langen Antwortzeiten des Systems führen. Alternativ kann in festgelegten Intervallen eine Regelberechnung erfolgen, die in einer separaten Datenbank abgespeichert wird, und ohne erhöhte Wartezeit Zusammenhänge bereitstellt.

6.5 Zusammenfassung der Methodik

Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Methodik zur datenbasierten Analyse von Änderungsausbreitungen in der Produktstruktur hat zum Ziel, in zukünftigen Entwicklungen durch geeignete Maßnahmen weniger, frühere, effektivere und effizientere Änderungen zu erlangen. Hierzu wurden die folgenden drei Bausteine erarbeitet und in Grundzügen bereits in einem ersten Prototyp exemplarisch umgesetzt.

Baustein 1: Vorgehen zur Erstellung eines Änderungsstrukturmodells

Das sechsstufige Vorgehen integriert Methoden des strukturellen Komplexitätsmanagements mit KDD und stellt ein matrixbasiertes Berechnungsverfahren zur datenbasierten Quantifizierung von Abhängigkeiten in MDM-basierten Änderungsstrukturmodellen bereit. Nach einer Ziel- und Systemdefinition werden über einen semi-automatischen Prozess und Anwendung der Assoziationsanalyse quantifizierte Abhängigkeiten aus umfangreichen Änderungsdaten abgeleitet. Daraus resultiert ein umfassendes Änderungsstrukturmodell, das Ausbreitungswahrscheinlichkeiten und -häufigkeiten zwischen sämtlichen Änderungsobjekten aufzeigt. Die Änderungsobjekte können hierbei auf verschiedenen Granularitätslevel der Produktstruktur (bspw.

Komponenten- oder Modulebene) für ein komplettes Entwicklungsprojekt dargestellt werden. Durch das Einbeziehen von Änderungsattributen (z. B. Material- oder Geometrieänderung) können zudem Abhängigkeiten, die zur Ausbreitungen von Änderungen führen, differenziert werden.

Baustein 2: A posteriori Analyse der Änderungsstruktur

Die a posteriori Analyse hat zum Ziel, Verbesserungspotenziale für neue Produktentwicklungen auf Basis der Änderungsstruktur zu identifizieren. Hierfür werden Analysemöglichkeiten auf Basis von Strukturmerkmalen (bspw. Knotengrad und Clusterkoeffizient) bereitgestellt, die Änderungsobjekte hinsichtlich ihrer Einbindung in der Änderungsstruktur und der damit erwarteten Änderungsausbreitung bewerten. Zusätzlich werden Änderungsattribute (bspw. Änderungsursache oder Zeitpunkt der Änderung) verwendet, um differenzierte strukturelle Zusammenhänge von Änderungsobjekten zu ermitteln. Aus diesen werden mit Hilfe einer Gegenüberstellung in Portfolios relevante Änderungsschwerpunkte, und damit Handlungsfelder zur Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen identifiziert.

Darüber hinaus wird eine Analyse der Produktmodularisierung bereitgestellt, mit der Unternehmen die Unabhängigkeit ihrer Module auf Basis der Änderungsstruktur bewerten können. Verbesserungspotenziale weisen dabei insbesondere jene Module auf, die durch viele inter-Modul-Relationen gekennzeichnet sind, die in einer modularen Produktstruktur idealerweise nicht auftreten sollten.

In Summe zeigt die a posteriori Analyse somit datenbasiert Handlungsfelder zur Reduzierung von änderungsbedingten Abhängigkeiten und Änderungshäufigkeit sowie zur früheren Identifikation von Änderungen in neuen Entwicklungsprojekten auf. Dadurch unterstützt diese Analyse unmittelbar die systematische Vorverlagerung und Vermeidung von Änderungen.

Baustein 3: A priori Analyse der Änderungsstruktur

Der dritte Baustein unterstützt die Beteiligten eines Änderungsprozesses bei der Bestimmung der Änderungsausbreitungen und -auswirkungen. Basierend auf getätigten Eingaben in einem Workflow-System werden bspw. mögliche Komponenten vorgeschlagen, die von der Änderung betroffen sein könnten. Die Vorschläge beruhen auf Assoziationsregeln, die aus vergangenen Änderungsdaten gewonnen werden und quantifizierte Zusammenhänge über die Maßzahlen Support, Konfidenz und Lift abbilden. Die Vorhersagegüte der Assoziationsregeln kann in der Anwendung durch eine ROC-Analyse stetig gemessen und verbessert werden, so dass mit zunehmender Menge an Änderungen bessere Vorhersagen resultieren. Durch die a priori Analyse erhalten Beteiligte eines Änderungsprozesses automatisch relevante Informationen über vergangene Änderungszusammenhänge, wodurch bspw. weniger Iterationen im Änderungsprozess entstehen und bessere Entscheidungen über Änderungen getroffen werden können. Der dritte Baustein zielt damit auf einen effizienteren und effektiveren Änderungsprozess ab.

Die Methodik zur datenbasierten Analyse von Änderungsausbreitungen stellt eine systematische Unterstützung dar, um in nachfolgenden Entwicklungen Änderung besser zu managen indem weniger, frühere sowie effizientere und effektivere Änderungen auftreten.

7. Einsatz und Evaluation der Methodik

In diesem Kapitel wird die entwickelte Methodik im industriellen Kontext angewandt und evaluiert. Die Evaluation fand in jeweils einem Unternehmen der Automobilindustrie und der Nutzfahrzeugbranche statt, wobei umfangreiche Änderungsdaten verschiedener Entwicklungsprojekte genutzt wurden. Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über das Evaluationskonzept gegeben, ehe der Einsatz sowie die Anwendungs- und Erfolgsevaluation der entwickelten Methodik in den beiden Unternehmen beschrieben wird. Eine Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse schließen das Kapitel ab.

7.1 Konzept zur Evaluation

Die drei Bausteine der Methodik wurden gemäß Blessing & Chakrabarti (2009) durch eine Anwendungs- und Erfolgsevaluation bewertet. Die Anwendungsevaluation übernahm hierbei die Aufgabe, die Anwendbarkeit der Methodik und deren Wirksamkeit auf die „key factors“ der Problemstellung zu überprüfen. Das sind jene Faktoren, die direkt durch die Methodik beeinflusst werden (bspw. Erkenntnisse über Änderungsabhängigkeiten). In der anschließenden Erfolgsevaluation wurde ermittelt, inwiefern die Methodik zur Erreichung der übergeordneten Zielsetzung beiträgt, sodass die Nützlichkeit des Ansatzes bewertet werden konnte. Hierfür wurde der Einfluss der „key factors“ auf die „Success factors“ der Methodik (bspw. Steigerung der Effizienz im Änderungsprozess) ermittelt (Blessing & Chakrabarti 2009, S. 184–195).

Da sich die vorliegende Dissertation am Forschungstyp fünf der DRM orientiert (vgl. Kapitel 1.3), wurde eine **initiale Evaluation** durchgeführt, die eine prinzipielle Anwendbarkeit und Nützlichkeit der entwickelten Methodik nachweist.

Die **Anwendungsevaluation** stützte sich auf den Einsatz der Methodik in zwei unterschiedlichen Unternehmen. In diesen wurden alle drei Bausteine basierend auf Workshops mit Unternehmensvertretern und der Verwendung realer Unternehmensdaten angewendet. Die Workshops wurden vor allem zur Ziel- und Systemdefinition, zur Auswahl der relevanten Änderungs- und Unternehmensdaten und zum Aufbau des benötigten Datenverständnisses für die Analysen und Überprüfung der Ergebnisse durchgeführt. Die Modellierung und Analyse der Änderungszusammenhänge fand am Lehrstuhl für Produktentwicklung statt und wurde von der Verfasserin dieser Arbeit und einer wissenschaftlichen Hilfskraft durchgeführt.

Zur anschließenden **Erfolgsevaluation** wurden erneut Workshops und Interviews mit den Unternehmen durchgeführt. Es wurde hierbei überprüft, inwiefern die erzielten Analyseergebnisse hinsichtlich der intendierten Verbesserungen des Änderungs- und Entwicklungsmanagements erfolgsversprechend waren. Der dritte Baustein wurde zusätzlich datenbasiert evaluiert, indem die Anwendung von Änderungsregeln über weitere Änderungsdaten simuliert wurde.

Die Fallstudien beziehen sich auf definierte Änderungsumfänge **zweier Unternehmen**, die mit vielen Änderungen in Entwicklungsprojekten konfrontiert waren, ein relativ komplexes Produkt entwickelten, das viele inhärente Abhängigkeiten aufwies, die zu Änderungsausbreitungen

fürten. Zudem besaßen beide Unternehmen sauber dokumentierte Änderungen und verwendeten Workflow-Tools zur Abwicklung und Dokumentation dieser. Die Unternehmen sind der Automobil- und Nutzfahrzeugbranche zuzuordnen, wobei in ersteren Änderungen eines Gesamtfahrzeugs und bei letzteren eines Dieselmotors untersucht wurden.

Nachfolgende Tabelle 7-1 zeigt zusammenfassend die wesentlichen Elemente und die Struktur des Evaluierungskonzepts.

Tabelle 7-1: Konzept zur Evaluation der Methodik in zwei Unternehmen

	Erstellung des Änderungsstruk- turmodells	A posteriori Analysen der Än- derungsstruktur	A priori Analysen der Änderungsaus- breitung
Fallstudie in der Automob- ilindustrie	Kapitel 7.2.1	Kapitel 7.2.2	Kapitel 7.2.3
Fallstudie in der Nutzfahr- zeugbranche	Kapitel 7.3.1	Kapitel 7.3.2	Kapitel 7.3.3
Anwendungsevaluation		Kapitel 7.4	
Erfolgsevaluation		Kapitel 7.5	

7.2 Fallstudie in der Automobilindustrie für drei Fahrzeugentwicklungsprojekte

In der Automobilbranche treten eine Vielzahl an technischen Änderungen auf, die häufig zu weitreichenden Änderungsausbreitungen innerhalb der Produktstruktur führen und dementsprechend zuverlässig und unter Berücksichtigung aller Schnittstellen umgesetzt werden müssen.

In Zusammenarbeit mit einem Automobilhersteller wurden technische Änderungen dreier Fahrzeugtypen einer Baureihe in ihrer Entwicklungsphase analysiert. Die Betrachtung erfolgte im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 768 im Teilprojekt B1 „Zyklusorientierte Planung und Koordination von Entwicklungsprozessen“. Eine Analyse von Änderungsdaten des selben Automobilherstellers, jedoch mit anderem Fokus, ist bereits in Auszügen veröffentlicht (Elezi et al. 2011; Sharafi 2013). Aus Gründen der Geheimhaltung können die erstellten, änderungsbedingten Strukturmodelle sowie die daraus abgeleiteten Analyseergebnisse nur in Auszügen und anonymisiert dargestellt werden.

7.2.1 Erstellung des Änderungsstrukturmodells

Die Ausgangsbasis für die Analyse von Änderungsausbreitungen stellte das Änderungsstrukturmodell dar, dessen Erstellung in diesem Kapitel für drei Fahrzeuge des Automobilherstellers beschrieben wird. Zur Wahrung der Anonymität des Unternehmens wurden die Entwicklungsprojekte in dieser Arbeit mit A, B und C referenziert. Das für die Modellerstellung angewandte Vorgehen entsprach dem in der Dissertation entwickelten Vorgehensmodell (siehe Kapitel 6.2) und besteht aus sechs Schritten. Zunächst fanden die Ziel- und Systemdefinition statt, die sehr

eng miteinander gekoppelt sind. Anschließend wurden erforderliche Informationen gesammelt und ausgewählt, um diese im nächsten Schritt vorzubereiten, zu bereinigen und in das gewünschte Format zu transformieren. Im nächsten Schritt fand das Data Mining Verfahren der Assoziationsanalyse Anwendung. Abschließend wurde die Änderungsstruktur visualisiert und hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft.

Die **Ziel- und Systemdefinition** fand zusammen mit dem Änderungsmanager und dem technischen Leiter der entsprechenden Fahrzeugreihe im Rahmen von zwei Terminen statt. Zudem wurden unternehmensspezifische Zusammenhänge erläutert, die in Bezug auf die technischen Änderungen im Unternehmen von Relevanz sind, bspw. das Vorherrschen von kommunalen Bauteilen/-gruppen zwischen den Modellreihen. Als Ziel wurde insbesondere die Identifikation von Keimzellen von technischen Änderungen definiert sowie das Offenlegen von Produkt- und Änderungszusammenhängen, die während des Entwicklungsprozesses aufgrund der Vielzahl und Komplexität schwer zu überblicken sind. Für die Systemdefinition wurden die Domänen Änderungen, Baustruktur (Einzelteile, Baugruppen und Module) und Organisation sowie deren Abhängigkeiten definiert.

Für die **Datenakquisition** wurde hauptsächlich eine Informationsquelle herangezogen: die unternehmensinterne Änderungsdatenbank. Durch eine gezielte Datenbankabfrage konnten Änderungen ausgeleitet werden, die den drei ausgewählten Fahrzeugprojekten zugeordnet sind. Die ausgewählten Änderungsdaten wurden im Format des Tabellenkalkulationsprogramms Excel gespeichert. Die Änderungsdatenbank des Automobilherstellers ist mit weiteren Informationsmanagement-Systemen des Unternehmens verknüpft, wodurch aus diesen relationale Daten gezogen werden. So sind wichtige Produkt- und Projektdaten, die üblicherweise in PDM- oder ERP-Systemen gespeichert sind, bereits in der Änderungsdatenbank enthalten. Eine Abfrage von Daten in weiteren Informationssystemen des Unternehmens war daher nicht erforderlich.

Im Schritt der **Datenvorbereitung und -bereinigung** wurden Fehler und Inkonsistenzen in der Datentabelle bereinigt. Zum Beispiel lagen Fehler bei der Nutzereingabe der Änderungsobjekte vor. Teilweise wurden mehrere Änderungsobjekte getrennt durch ein Komma in ein Feld eingetragen, das nur für ein Änderungsobjekt vorgesehen war. Bei der weiteren datentechnischen Verarbeitung würde dies zu Fehlern führen, da exakt nach dem eingegebenen Änderungsobjekt gesucht wird. Die Datenvorbereitung und -bereinigung wurde mit der Software RapidMiner umgesetzt, eine Umgebung für maschinelles Lernen und Data Mining, die eine Vielzahl von Operatoren für die Daten Ein- und Ausgabe sowie die Datenvorbereitung und den eigentlichen Schritt des Data Mining bereitstellt.

In der folgenden **Datentransformation** wurden die Änderungsdaten in das Datenformat überführt, das für die Assoziationsanalyse erforderlich ist. Hierbei handelt es sich um eine numerische Datenmatrix. Wie bereits im vorangegangenen Schritt wird für die Datentransformation RapidMiner verwendet, der mit Hilfe der „pre-processing“ Operatoren die Transformation für die große Anzahl an Änderungsdaten automatisiert durchführt. Das Ergebnis der Transformation ist eine numerische DMM, je Fahrzeugentwicklungsprojekt mit den Domänen Änderungen und Änderungsobjekten. Tabelle 7-2 zeigt diese ausschnittsweise für Entwicklungsprojekt A.

Tabelle 7-4: Ausschnitt aus der DSM mit Support, Konfidenz und Lift für Entwicklungsprojekt A

	BG 31	BG 32	BG 33	BG 34	BG 35	BG 36	BG 37	BG 38	BG 39	BG 40	BG 41	BG 42	BG 43	BG 44	BG 45	BG 46	BG 47	BG 48	BG 49	...	BG 50
BG 31	1/ 0,057	0,3/ 0,017	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 32	0,3/ 0,017	1/ 0,057	0/0	0/0	0/0	0,2/ 0,011	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 33	0/0	0/0	1/ 0,034	0/0	0,17/ 0,006	0/0	0,17/ 0,006	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 34	0/0	0/0	0/0	1/ 0,017	0/0	0,33/ 0,006	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 35	0/0	0/0	0,33/ 0,006	0/0	1/ 0,017	0,33/ 0,006	0,33/ 0,006	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 36	0/0	0,08/ 0,011	0/0	0,04/ 0,006	0,04/ 0,006	1/ 0,138	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0,04/ 0,006	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 37	0/0	0/0	0,17/ 0,006	0/0	0,17/ 0,006	0/0	1/ 0,034	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 38	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/ 0,052	0/0	0/0	0/0	0/0	0,11/ 0,006	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 39	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/ 0,063	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 40	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/ 0,057	0,1/ 0,006	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 41	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0,25/ 0,006	1/ 0,023	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 42	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/ 0,006	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 43	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/ 0,006	0/0	0/ 0,006	0/0	0/0	0/0	0/0	1/ 0,105	0/0	0/ 0,006	0/ 0,006	0/ 0,006	0,02/ 0,023	0/0	0/0	0/ 0,006
BG 44	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/ 0,006	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
BG 45	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/ 0,006	0/0	1/ 0,006	0/0	0/0	1/ 0,006	0/0	0/0	0/0
BG 46	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0,01/ 0,006	0/0	0/0	1/ 0,385	0/0	0,04/ 0,017	0/0	0/0	0/0
BG 47	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0,06/ 0,006	0/0	0/0	0/0	1/ 0,092	0,06/ 0,006	0/0	0/0	0/0
BG 48	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0,16/ 0,023	0/0	0,04/ 0,006	0,12/ 0,017	0,04/ 0,006	1/ 0,144	0/0	0/0	0/0
BG 49	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/ 0,006	0/0	0/0
...																					
BG 50	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0,02/ 0,006	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/ 0,27

Legende: Konfidenz / Support Farbliche Kennzeichnung für Lift > 1

Regeln oder relevante Zusammenhänge ergaben sich aus der kombinierten DSM, indem Relationen zwischen Baugruppen identifiziert werden, die einen definierten minimalen Support und Konfidenz übersteigen und einen Lift größer eins aufweisen. Der minimale Support bestimmt, wie häufig Kombinationen von Änderungsobjekten in den Datensätzen vorkommen müssen, dass diese in der Regelbildung berücksichtigt werden. In dem Entwicklungsprojekt wurden 1.725 Änderungen vorgenommen. Besteht bspw. die Anforderung, dass eine Regel mindestens fünf Mal in den Änderungen auftritt, so ist ein minimaler Support von $5/1.725 (=0,003)$ erforderlich. Der Konfidenz beschreibt schließlich die Ausbreitungswahrscheinlichkeit im Falle der Änderung einer Baugruppe. Auf Basis dieser Festlegungen ergeben sich in dem Ausschnitt der DSM zahlreiche relevante Zusammenhänge, die den minimalen Support- und Konfidenzwert übersteigen, beispielsweise zwischen Baugruppe 31 und 32 (Support = 0,017; Konfidenz = 0,33; Lift > 1).

Neben der Matrixberechnung zur Ableitung paarweiser Zusammenhänge zwischen den Baugruppen wurde die Berechnung mittels dem Data Mining Algorithmus (vgl. Kapitel 6.4.2) vorgenommen, der die Suche nach größeren Itemsets³⁸ unterstützt. Der zugehörige Data Mining Prozess ist in Abbildung 7-1 dargestellt.

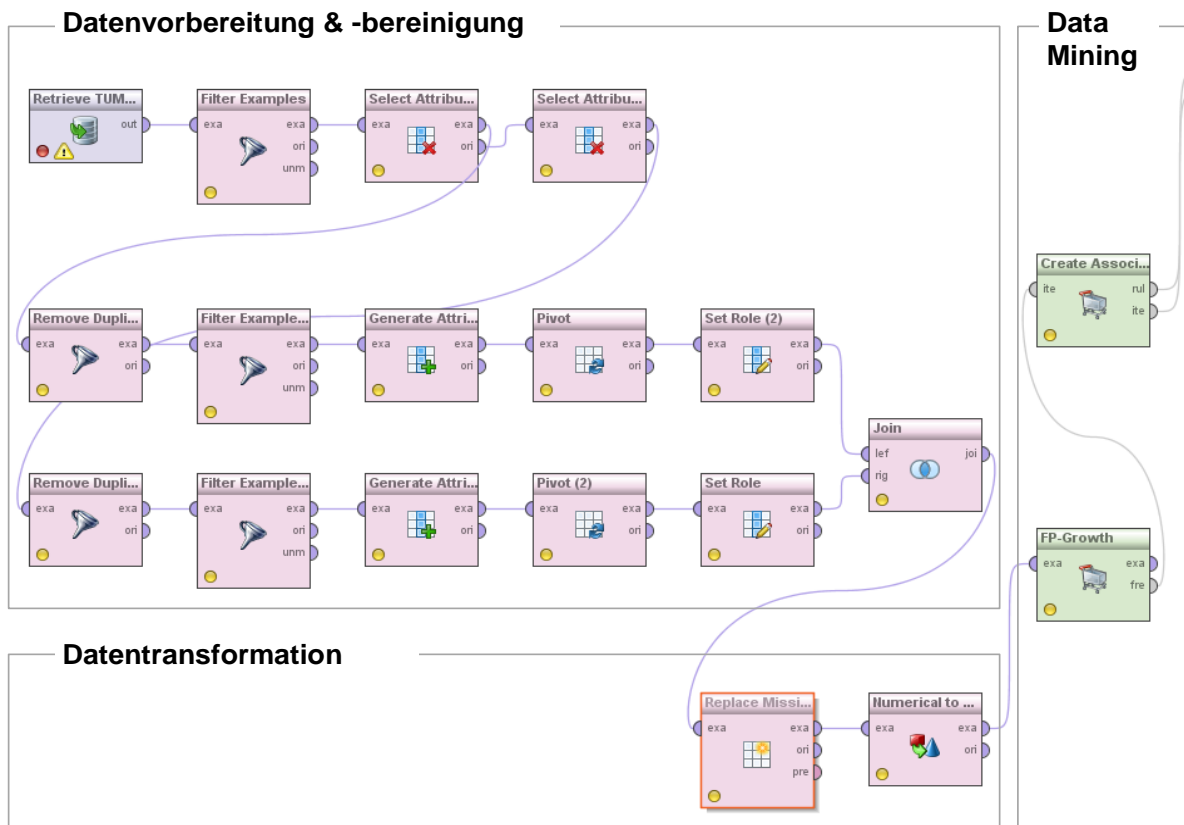


Abbildung 7-1: Prozessmodellierung zur Generierung von Änderungsregeln (genutzte Software: RapidMiner³⁹)

Insgesamt wurden für das Entwicklungsprojekt A des Automobilherstellers 31 Assoziationsregeln entdeckt, die einen minimalen Support von 0,001 aufweisen und einen Konfidenz zwischen 0,8 und 1. Die Ausgabe der Regeln erfolgte in tabellarischer Form unter Angabe von Prämisse und Konklusion sowie den relevanten Maßzahlen Support, Konfidenz und Lift (s. Anhang Tabelle 10-10).

Für die folgende Evaluierung und Visualisierung der Ergebnisse, die einem Teil des KDD-Prozesses entspricht, wurden die erzeugten Strukturmodelle als Graph dargestellt. In Abbildung 7-2 ist die Änderungsstruktur von Entwicklungsprojekt A mit 1.725 Änderungen und 170 Baugruppen dargestellt. Dieses Ergebnis kann als repräsentativ für die drei analysierten Entwicklungsprojekte angesehen werden.

³⁸ Dadurch können Regeln zwischen Mengen von Änderungsobjekten identifiziert werden, z. B. „wenn der Kolben und Kolbenring geändert werden, dann wird wahrscheinlich auch der Kolbenbolzen geändert“.

³⁹ Es wurde RapidMiner Studio 6.0.008 verwendet. Für weitere Informationen siehe www.rapidminer.com.

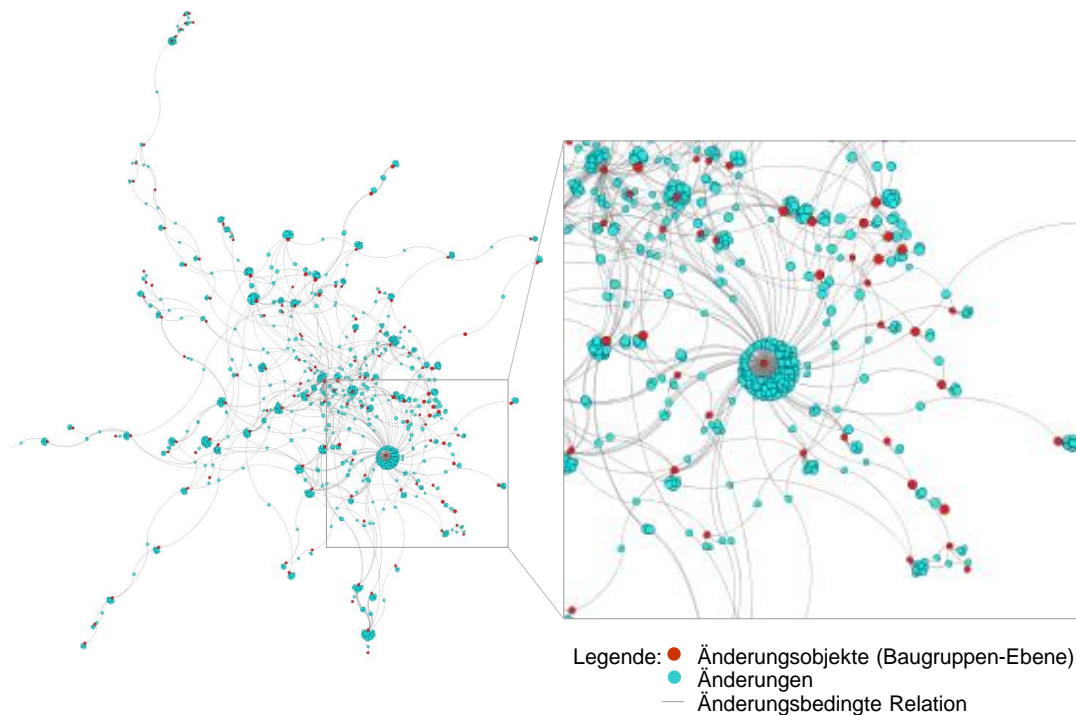


Abbildung 7-2: Änderungsabhängigkeiten innerhalb eines Entwicklungsprojekts
(rot: Änderungsobjekte, Türkis: Änderungen, grau: Relationen)(genutzte Software: Gephi⁴⁰)

In der Graphendarstellung, die mit der Software Gephi realisiert wurde, siedeln sich stark vernetzte Änderungen und Baugruppen im Zentrum des Graphen an, weniger stark vernetzte Elemente lassen sich am Rand des Graphen nieder. Dadurch wird eine visuelle Interpretation der Abhängigkeiten ermöglicht. Die Abbildung verdeutlicht, wie viele Änderungen an einzelnen Baugruppen stattfanden und wie vernetzt diese hinsichtlich der Baugruppen sind.

Abbildung 7-3 zeigt die DSM der Änderungsobjekte in einer Graphendarstellung und damit die änderungsbedingten Abhängigkeiten zwischen Baugruppen.

⁴⁰ Es wurde die Version Gephi 0.8.2 verwendet. Für weitere Informationen zur Software siehe <https://gephi.org/>.

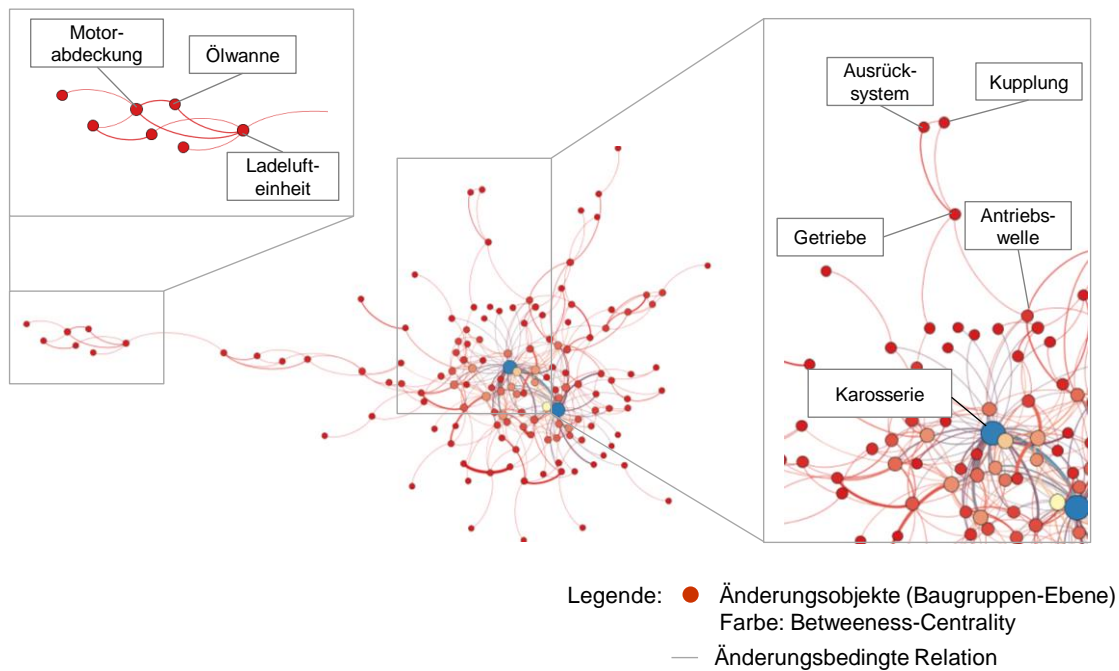


Abbildung 7-3: Abhängigkeiten zwischen Baugruppen eines Fahrzeugs im Entwicklungsprojekt A

Die erzielten Ergebnisse wurden in einem gemeinsamen Termin mit dem Änderungsverantwortlichen der drei Fahrzeugentwicklungsprojekte diskutiert und hinsichtlich ihrer Richtigkeit und Plausibilität beurteilt, so dass die nachfolgenden Analysen auf verifizierte Zusammenhänge aufbauen konnten.

7.2.2 A posteriori Analyse der Änderungsstruktur

In der a posteriori Analyse wurden die generierten und sehr umfangreichen Änderungsstrukturmodelle der drei Fahrzeugentwicklungsprojekte analysiert. Das Ziel der Analyse bestand in der retrospektiven Identifikation von versteckten und interessanten Änderungszusammenhängen. Während des Entwicklungsprojekts ist es schwierig Zusammenhänge zu erkennen, da Änderungen zeitlich versetzt auftreten sowie von unterschiedlichen Unternehmensbereichen identifiziert und umgesetzt werden. Dadurch werden Änderungen häufig als Einzelereignisse aufgefasst und deren Zusammenhang im Entwicklungsprojekt wird nicht direkt ersichtlich.

Zur Identifikation von relevanten Zusammenhängen wurden die erstellten Änderungsmodelle systematisch analysiert. Hierbei wurden die in Kapitel 6.3.2 beschriebenen globalen und lokalen Strukturmerkmalen zur Analyse der MDM-basierten Änderungsstrukturmodelle verwendet. Die **globalen Strukturmerkmale** beschreiben die Änderungsstruktur in ihrer Gesamtheit hinsichtlich der einzelnen Domänen und deren Vernetzung. In Tabelle 7-5 sind diese für die drei Entwicklungsprojekte vergleichend dargestellt. Deutlich wird hierbei die große Anzahl an Änderungen je Entwicklungsprojekt (durchschnittlich ca. 2.000 Stück), die Anzahl an Änderungen je Änderungsobjekt (durchschnittlich ca. 14,3 Änderungen) und die Anzahl an Änderungsob-

jekten, die Änderungen betroffen sind (durchschnittlich ca. 1,3). Zudem verdeutlicht ein Vergleich der globalen Strukturmerkmale der drei Entwicklungsprojekte deren strukturelle Ähnlichkeit.

Tabelle 7-5: Globale Strukturmerkmale der drei Entwicklungsprojekte in der Automobilindustrie

	Projekt A	Projekt B	Projekt C
Anzahl der Knoten (Domäne Änderungen)	1725	2530	1944
Anzahl der Knoten (Domäne Änderungsobjekte)	174	197	181
Kanten zwischen Änderungen und Bauteilen	2166	3374	2431
Kanten zwischen Bauteilen	724	663	804
Ø Knotengrad Änderungen (Änderungs-DMM)	1,3	1,3	1,3
Ø Knotengrad der Bauteile (Änderungs-DMM)	12,4	17,1	13,4
Ø Knotengrad von Bauteilen (Bauteile DSM)	4,2	6,7	4,4

Gegenüber globalen Strukturmerkmalen, die für die entsprechenden Entwicklungsprojekte des Automobilherstellers die Gesamtstruktur von Änderungen in Bezug auf das Produkt beschreiben, adressieren lokale Strukturmerkmale einzelne Änderungen und Bauteile sowie deren Relationen.

Auf Basis der Vernetzung wurden mit **lokalen Strukturmerkmalen** einzelne Änderungen und Änderungsobjekte identifiziert und bewertet, die für die Änderungsstrategien der Vorverlagerung und Vermeidung von Bedeutung sind. Hierbei wurden die in Kapitel 6.3.2 beschriebenen lokalen Strukturmerkmale verwendet: Knotengrad, Clustering Koeffizient, Distanzzentralität und mittlere Distanz. Im Folgenden sind Auszüge aus den Ergebnissen für das Entwicklungsprojekt A dargestellt.

Abbildung 7-4 zeigt eine Gegenüberstellung der lokalen Strukturmerkmalen für die Baugruppen des Entwicklungsprojekts A. Es sind die änderungsbedingten Vernetzungen zu Baugruppen, über den Knotengrad, die Änderungshäufigkeit sowie das Auftreten von späten Änderungen im Entwicklungsprozess dargestellt. Das Diagramm verdeutlicht den Zusammenhang zwischen stark vernetzten Baugruppen, deren Änderungshäufigkeit und dem Vorkommen von späten Änderungen. Es unterstützt die Strategien Vermeidung und Vorverlagerung, indem Baugruppen mit einer starken Vernetzung in der Produktstruktur und einer gleichzeitig hohen Änderungshäufigkeit im oberen rechten Feld visualisiert werden. Diese Baugruppen sind von Experten zu diskutieren und hinsichtlich der Einführung von Maßnahmen zur Änderungsvermeidung und -vorverlagerung in neuen Entwicklungsprojekten zu bewerten. Werden Änderungen bzw. späte Änderungen an diesen Baugruppen vermieden, kann ein erhebliches Einsparpotenzial ausgeschöpft werden.

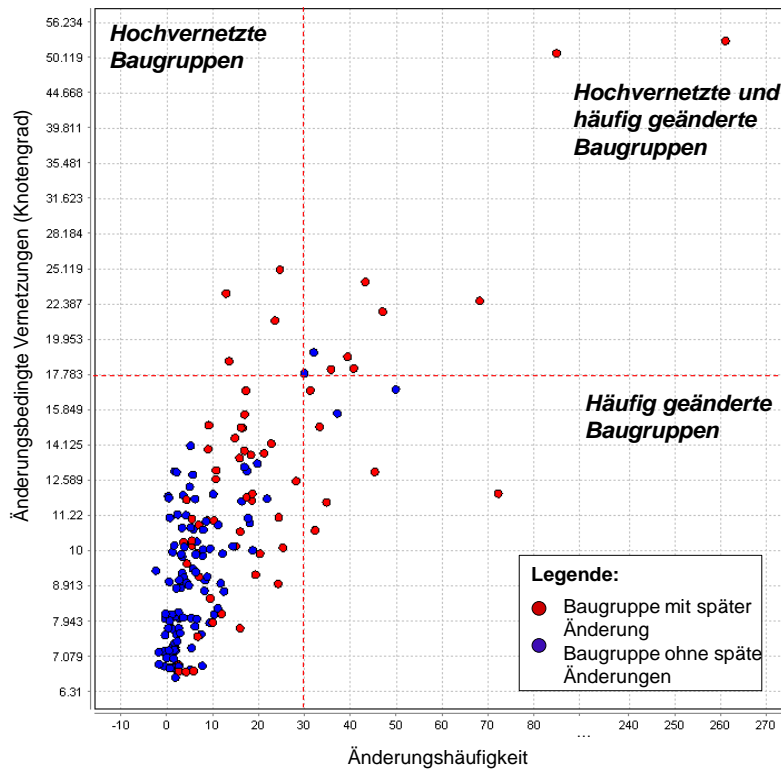


Abbildung 7-4: Änderungsbedingte Vernetzung und Änderungshäufigkeit in Entwicklungsprojekt A (genutzte Software: RapidMiner)

Ebenfalls analysiert, aber nicht dargestellt, wurden die Abhängigkeiten zwischen Organisationseinheiten auf Basis technischer Änderungen. Das Ziel bestand darin, entsprechend der a posteriori Analyse die Unternehmensbereiche zu identifizieren, die durch eine stärkere Zusammenarbeit Änderungen reduzieren könnten. Da der Automobilhersteller allerdings einer Matrixorganisation unterliegt, war die resultierende Struktur nahezu identisch zur Änderungsstruktur auf Modulebene, wodurch keine neuen Zusammenhänge identifiziert wurden.

7.2.3 A priori Analyse der Änderungsausbreitung

Änderungsregeln werden aus Änderungsdaten eines oder mehrerer vergangener Fahrzeugentwicklungsprojekte gewonnen und in neuen Projekten zur Vorhersage der Änderungsausbreitung genutzt. Die Änderungsregeln wurden in dieser Arbeit mit dem Software RapidMiner generiert. Hierbei wurden die in Kapitel 6.4.2 beschriebenen Schritte wie folgt durchgeführt:

Auswahl der Änderungsdaten: Die Auswahl beschränkt sich zunächst auf Änderungen des Fahrzeugprojekts A⁴¹ des Automobilherstellers sowie betroffene Baugruppen. Es resultieren

⁴¹ Die Änderungsdaten der Fahrzeugprojekte B und C werden für die Evaluation der Regeln bzw. der Methodik verwendet.

für dieses Fahrzeugprojekt 1.725 Änderungen und 174 Baugruppen, die von Änderungen betroffen waren.

Maßzahlen zur Regelbestimmung: Der minimale Support wurde mit 0,001 angesetzt, wodurch Baugruppen mindestens 2-mal zusammen Umfang von Änderungen in dem Fahrzeugprojekt sein müssen, um in den Änderungsregeln berücksichtigt zu werden. Für den Konfidenz wurde zunächst ein Wert von mindestens 0,5 festgelegt. Nach Festlegen der Grenzwerte für Support und Konfidenz sowie der Anwendung des FP-growth Algorithmus in RapidMiner wurden 264 sogenannte *frequent itemsets* in den Änderungsdaten identifiziert, die bis zu vier Baugruppen beinhalteten. Aus den *frequent itemsets* wurden anschließend 31 Regeln unter Angabe von Support, Konfidenz und Lift ermittelt (s. Tabelle 10-10 im Anhang).

Priorisierung der Regeln: Die Priorisierung der Regeln erfolgte, wie in Kapitel 6.4.2 beschrieben, anhand der zu ändernden Baugruppen (Kongruenz), dem Konfidenz sowie Lift der Regel. Dies wurde an den Baugruppen 78 & 133 exemplarisch dargestellt, die in der Prämisse von fünf Regeln auftreten (s. Tabelle 7-6).

Tabelle 7-6: Auszug aus den Änderungsregeln von Fahrzeugprojekt A (Prämisse enthält Baugruppe 133)

	Prämisse	Konklusion	Support	Konfidenz	Lift
18	Baugruppe 78 & 133	Baugruppe 132	0,0012	1	215
19	Baugruppe 78 & 133	Baugruppe 134	0,0012	1	287500
26	Baugruppe 78 & 133	Baugruppe 132 & 134	0,0012	1	862500
27	Baugruppe 78, 133 & 132	Baugruppe 134	0,0012	1	287500
28	Baugruppe 78, 133 & 134	Baugruppe 132	0,0012	1	216

Tritt nun an den Baugruppen 78 & 133 eine Änderung auf, so werden die Regeln priorisiert, die die größte Übereinstimmung in der Prämisse bezüglich der Baugruppen haben: Regeln 18, 19 und 26. Anschließend wird nach dem Konfidenz und Lift sortiert, woraus sich folgende Reihenfolge für eine Priorisierung von Regeln ergibt: Regeln 26, 19, 18, 27 und 28. Auf dieser Basis werden schließlich folgende Baugruppen für eine Änderungsausbreitung vorgeschlagen: Baugruppe 132 & 134 gemeinsam sowie Baugruppe 134 und Baugruppe 132 einzeln.

Evaluation der Regeln: In der Evaluation wurde überprüft, inwiefern mit den erzeugten Änderungsregeln gute Vorhersagen getroffen werden konnten. Da Änderungsdaten aus einem weiteren und ähnlichen Entwicklungsprojekt B⁴² vorliegen, werden diese Daten für die Evaluation der Regeln verwendet. Für jede Änderung in diesem Entwicklungsprojekt wurde die tatsächliche Änderungsausbreitung mit der vorhergesagten Änderungsausbreitung verglichen. Hierfür wird der Operator „Apply Association Rules“ in RapidMiner angewendet.

⁴² Die Änderungsdaten aus Entwicklungsprojekt C werden in der Erfolgsevaluation verwendet.

Hierbei werden vier Fällen der Regelanwendung (vgl. Kapitel 3.2) unterschieden.

1. **True positive (tp):** Eine Prämisse liegt vor und die Konklusion tritt ein.
2. **False negative (fn):** Eine Prämisse liegt nicht vor und die Konklusion tritt ein.
3. **False positive (fp):** Eine Prämisse liegt vor und die Konklusion tritt nicht ein.
4. **True negativ (tn):** Eine Prämisse liegt nicht vor und die Konklusion tritt nicht ein.

Aus den Regelanwendungen werden die Häufigkeiten für die vier Fälle abgeleitet und in der Konfusionsmatrix in Tabelle 7-7 abgebildet.

Tabelle 7-7: Konfusionsmatrizen der Regelanwendung in Projekt B (min. Konfidenz 0,5 und min. Support 0,001)

	Konklusion tritt ein	Konklusion tritt nicht ein
Prämisse liegt vor (tp+fp)	tp=98	fp=253
Prämisse liegt nicht vor (fn+tn)	fn=827	tn=1392

Durch eine folgende Sensitivitätsanalyse bezüglich des minimalen Konfidenz- und Supportwerts unter Verwendung der ROC-Analyse konnten die optimalen Werte für die Regelanwendung ermittelt werden. Hierfür wurden die true-positive-Rate (TPR) und false-positive-Rate (FPR) für unterschiedliche Support- und Konfidenzwerte berechnet (vgl. Kapitel 6.4.2). Die Ergebnisse der Regelanwendung auf Änderungen in Projekt B zeigt Abbildung 7-5. Die vollständige Auswertung ist im Anhang in Tabelle 10-11 zu finden.

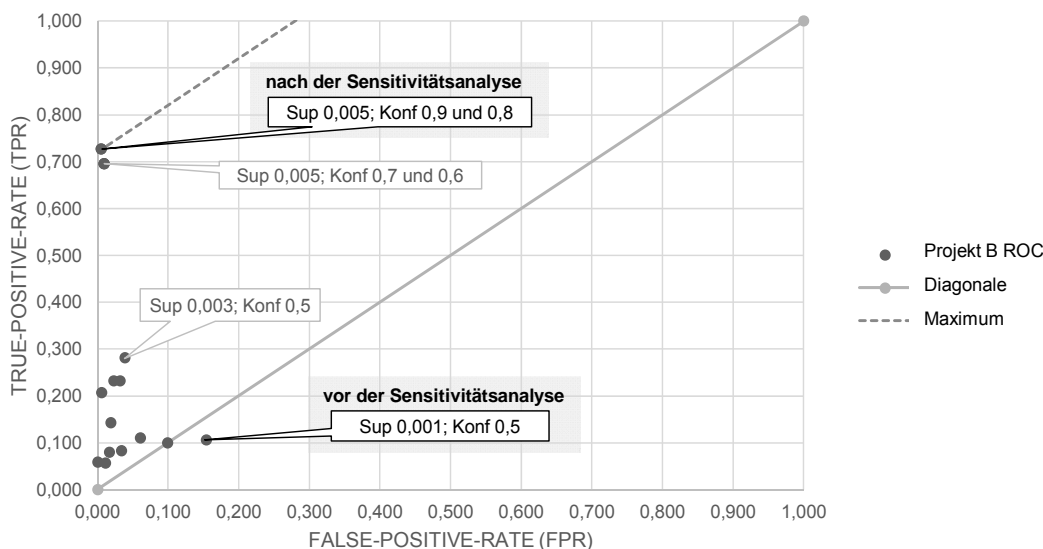


Abbildung 7-5: ROC-Diagramm der Regelanwendung von Projekt A auf Projekt B

Durch die Sensitivitätsanalyse konnte die initiale Wahl der Support- und Konfidenzwerte in Bezug auf Entwicklungsprojekt B stark verbessert werden. So konnte die true-positive-Rate bei gleichzeitiger Reduktion der false-positive-Rate von 0,106 auf 0,727 erhöht werden. Damit liegt der Wert deutlich über der Diagonalen und signalisiert eine sehr gute Vorhersagegüte, da viel häufiger richtige als falsche Vorhersagen getroffen werden. Die generierten Regeln wurden daher als sinnvoll für das Unternehmen eingestuft.

7.3 Fallstudie in der Nutzfahrzeugbranche für drei Lebenszyklusphasen eines Motors

Das Unternehmen entwickelt und produziert in einem Geschäftsbereich Dieselmotoren für Nutzfahrzeuge, Industrie-, Bahn- und Marineanwendungen. Aufgrund der stetig neuen Richtlinien und Verordnungen für Emissionsgrenzwerte in den unterschiedlichen Anwendungsfeldern werden die Motoren laufend weiterentwickelt und hinsichtlich neuer Anforderungen angepasst.

In den letzten Jahrzehnten hat die Komplexität der Motoren stark zugenommen, insbesondere durch die gestiegenen Anforderungen an die Abgasnachbehandlung. Es wurden neue Teilsysteme benötigt, wie bspw. die Zuführung der Harnstofflösung, die Rückführung von Abgasen in die Verbrennung oder die On-Board-Diagnostik, die eine Vielzahl an Sensoren erforderte. Die Erreichung der gesetzlich vorgegebenen Emissionswerte lässt sich zudem nur durch eine feine Abstimmung der einzelnen Komponenten des Motors erreichen, wodurch sich zahlreiche neue Abhängigkeiten in der Produktstruktur ergeben.

Werden Änderungen an einzelnen Motorkomponenten durchgeführt, besteht die Herausforderung, alle erforderlichen Abhängigkeiten zu (er-)kennen, um die Änderungsausbreitungen innerhalb des Motors abschätzen zu können. Nicht berücksichtigte Abhängigkeiten können weitreichende wirtschaftliche und technische Risiken für das Unternehmen mit sich bringen.

Durch eine Analyse vergangener Änderungen sollen wichtige änderungsbedingte Abhängigkeiten innerhalb der Produktstruktur eines Motors aufgedeckt werden, so dass diese in neuen Motorenprojekten wiederverwendet werden können und zu einem effektiveren und effizienteren Umgang mit Änderungen führen. Im Fokus der Analyse standen Änderungen an einem Sechszylinder Dieselmotor, der nachfolgend als Motor R6 bezeichnet wird. Im Rahmen der Fallstudie wurden technische Änderungen aus drei Lebenszyklusphasen des Motors betrachtet, die die Serienbetreuung und Weiterentwicklung beinhalteten (s. Abbildung 7-6).

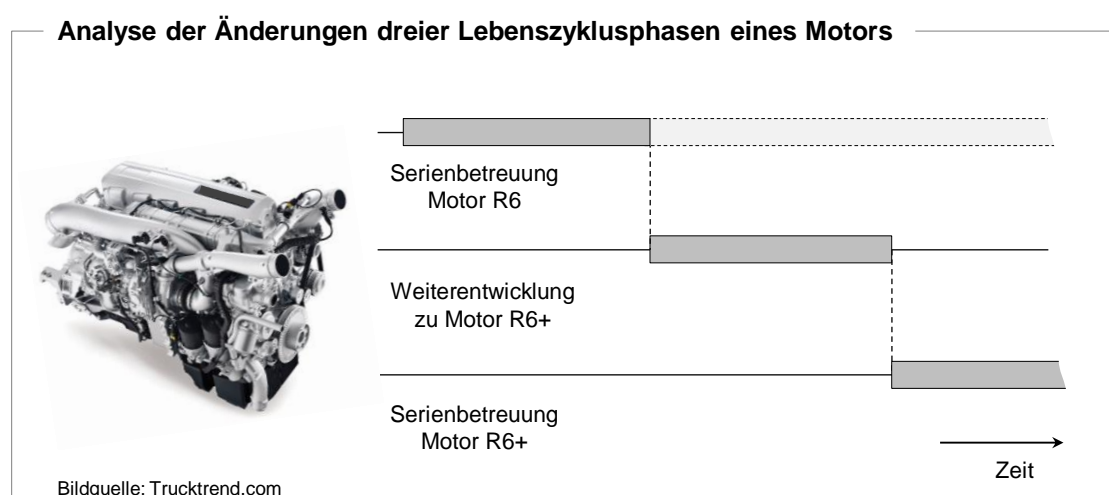


Abbildung 7-6: Zeitliche Einordnung der analysierten technischen Änderungen eines Sechszylindermotors

In Kooperation mit dem Industrieunternehmen wurde die Methodik zur Identifikation und Analyse von Änderungsabhängigkeiten in der Produktstruktur angewendet. Motorübergreifende Änderungsabhängigkeiten, welche bspw. durch Gleichteileverwendung entstehen, wurden in der Fallstudie nicht berücksichtigt. Aus Gründen der Geheimhaltung wird nachfolgend nur ein Teil der Analysen in abgewandelter Form beschrieben.

7.3.1 Erstellung des Änderungsstrukturmodells

Für drei Lebenszyklusphasen eines Sechszylindermotors (siehe Abbildung 7-6) wurden die Änderungsstrukturmodelle anhand des sechsstufigen Vorgehensmodells (siehe Kapitel 6.2.2) erstellt. In Zusammenarbeit mit dem Industriepartner wurden die Schritte wie nachfolgend beschrieben durchgeführt.

Die **Ziel- und Systemdefinition** fand in einem gemeinsamen Termin mit dem Leiter der Motorenkonstruktion, dem Leiter der Stückliste sowie drei Mitarbeitern aus zugehörigen Fachabteilungen statt. In diesem Termin wurde der entsprechende Motor ausgewählt, die jeweiligen Lebenszyklusphasen definiert und die Zielsetzung für die Analyse spezifiziert. In einem nachfolgenden Termin mit drei Mitarbeitern aus der Konstruktion- und Stücklistenabteilung wurde eine sinnvolle Ebene der Produktstruktur festgelegt, auf welcher Zusammenhänge extrahiert werden sollten.

In der **Datenakquisition** wurden Änderungsdaten entsprechend der definierten Systemgrenze aus der unternehmensinternen Änderungsdatenbank ausgeleitet und als Excel-Tabelle zur Verfügung gestellt. Zudem wurden Hintergrundinformationen zu den unternehmensspezifischen Änderungsdaten bereitgestellt, die für das Verständnis und den Aufbau der Analysen notwendig waren. Da das Unternehmen ein aussagekräftiges und sehr gepflegtes Nummernsystem hat, war es möglich, über die Identifizierungsnummer Rückschlüsse auf das Änderungsobjekt zu erhalten (bspw. welcher Funktionsgruppe dieses angehört oder welches Werk die Bauteilverantwortlichkeit trägt). Für einen Änderungsdatensatz wurden zudem Änderungsgründe bereitgestellt.

In der **Datenvorbereitung und -bereinigung** wurden die Änderungsdaten unter Anwendung von RapidMiner für die nachfolgenden Schritte aufbereitet. Die technischen Änderungen, die vom Motorenhersteller beispielsweise in Hinzu- und Entfalländerungen untergliedert werden, wurden für die Analysen zusammengeführt. Die Identifizierungsnummern der Änderungsobjekte wurden auf die Mittelnummern reduziert und somit gruppiert. Nicht vollständige Änderungsdatensätze wurden aussortiert und in der Modellerstellung nicht berücksichtigt.

Im Schritt der **Datentransformation** wurden die Daten unter Anwendung von RapidMiner in eine numerische Datenmatrix überführt. Die Ableitung relevanter Zusammenhänge erfolgte im Schritt **Data Mining** durch Berechnung der Maßzahlen Support, Konfidenz und Lift. Tabelle 7-8 zeigt exemplarisch die Änderungszusammenhänge aus der Serienbetreuung des Motor R6 auf höchster Strukturebene mit den zugehörigen, relevanten Maßzahlen. Für das Unternehmen wurden weitere DSMs erstellt, worin die neun Gruppen in 285 bzw. 180 Elemente aufgegliedert wurden, wodurch sehr viel spezifischere und detailliertere Zusammenhänge abgeleitet werden konnten. Aus Gründen der Geheimhaltung sind diese jedoch nicht in der Dissertation abgebildet.

Tabelle 7-8: Quantifizierte Änderungsstruktur auf höchster Strukturebene (Serienbetreuung des Motor R6)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 Grundmotor	1 / 0,485	0,05 / 0,025	0,1 / 0,048	0,03 / 0,017	0,05 / 0,025	0,05 / 0,022	0,01 / 0,006	0,01 / 0,003	0,18 / 0,087
2 Kraftstoff- & Abgassystem	0,16 / 0,025	1 / 0,162	0,22 / 0,036	0,1 / 0,017	0,02 / 0,003	0,03 / 0,006	0 / 0	0,02 / 0,003	0,22 / 0,036
3 Elektrische Anlagen	0,38 / 0,048	0,29 / 0,036	1 / 0,126	0,11 / 0,014	0,04 / 0,006	0,13 / 0,017	0 / 0	0,02 / 0,003	0,36 / 0,045
4 Getriebe & Kupplung	0,18 / 0,017	0,18 / 0,017	0,15 / 0,014	1 / 0,095	0,09 / 0,008	0,03 / 0,003	0,06 / 0,006	0,03 / 0,003	0,29 / 0,028
5 Fahrgestell	0,26 / 0,025	0,03 / 0,003	0,06 / 0,006	0,09 / 0,008	1 / 0,098	0,06 / 0,006	0,06 / 0,006	0 / 0	0,34 / 0,034
6 Bremssystem & Kompressoren	0,24 / 0,022	0,06 / 0,006	0,18 / 0,017	0,03 / 0,003	0,06 / 0,006	1 / 0,092	0 / 0	0,03 / 0,003	0,24 / 0,022
7 Aufbau I	1 / 0,006	0 / 0	0 / 0	1 / 0,006	1 / 0,006	0 / 0	1 / 0,006	0 / 0	1 / 0,006
8 Aufbau II	1 / 0,003	1 / 0,003	1 / 0,003	1 / 0,003	0 / 0	1 / 0,003	0 / 0	1 / 0,003	1 / 0,003
9 Allg. Bauelemente	0,35 / 0,087	0,15 / 0,036	0,18 / 0,045	0,11 / 0,028	0,14 / 0,034	0,09 / 0,022	0,02 / 0,006	0,01 / 0,003	1 / 0,246

Legende: Konfidenz / Support Farbliche Kennzeichnung für Lift > 1

Zur anschließenden **Evaluation** der Data Mining Ergebnisse wurden die Änderungsstrukturen visualisiert und hinsichtlich ihrer Richtigkeit mit Unternehmensvertretern diskutiert. Abbildung 7-7 zeigt exemplarisch die Zusammenhänge zwischen Änderungen und Änderungsobjekten in einer der Lebenszyklusphasen des Motors auf Komponentenebene.

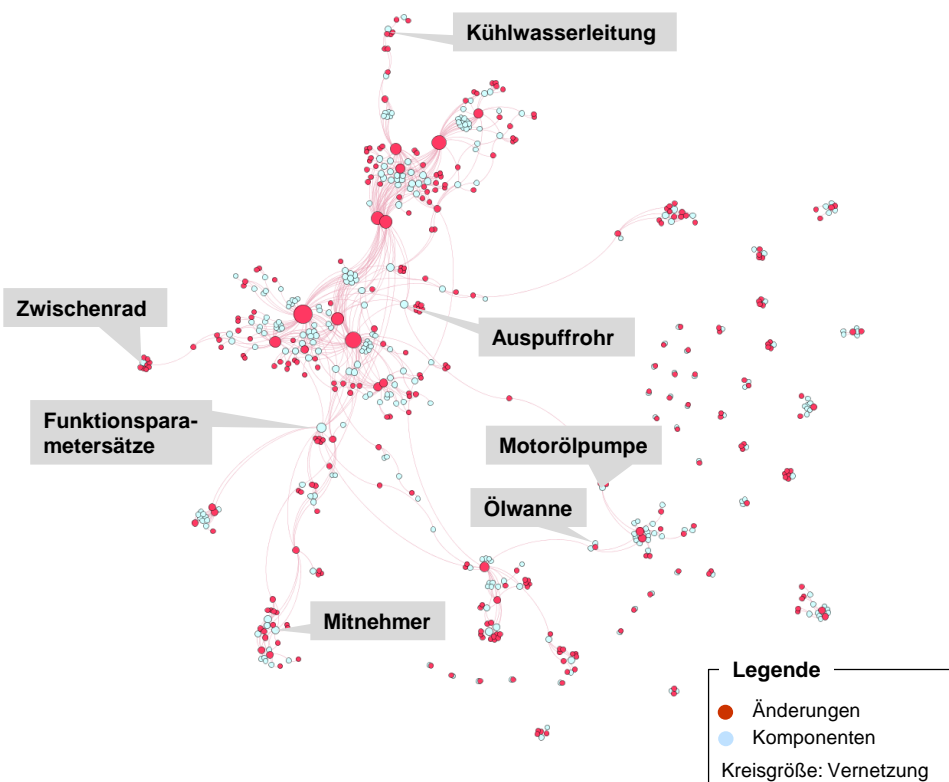


Abbildung 7-7: Änderungsabhängigkeiten innerhalb einer Lebenszyklusphasen des Motors

Aufgrund der starken Vernetzung von Normteilen, die eine Änderungsstruktur nur schwer erkennen ließen, wurden die Normteile entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu Konstruktionsgruppen nochmals untergliedert.

Die Visualisierung der Änderungsstruktur als Graph verdeutlicht die Inhomogenität der Änderungsverteilung bezüglich der Motorkomponenten. So sind einige Komponenten stark von Änderungen betroffen, andere hingegen weisen nur wenige Änderungen auf. Auch die Vernetzung einzelner Änderungen wird im Graph ersichtlich, sie korrespondiert zum Knotengrad einer Änderung.

Die änderungsbedingten Abhängigkeiten zwischen Motorkomponenten zeigt Abbildung 7-8. Zu erkennen ist eine Clusterbildung mit stärker vernetzten Teilstrukturen sowie eine Vernetzung der Cluster untereinander. Einige Änderungsobjekte weisen paarweise Abhängigkeiten auf oder sind komplett unabhängig. Über die farbige Codierung der Änderungsstruktur im Graph werden Häufigkeiten von Änderungen an den jeweiligen Komponenten visualisiert. Die analytische Untersuchung der Änderungsstruktur erfolgt in der nachfolgenden a posteriori Analyse (Kapitel 7.3.2).

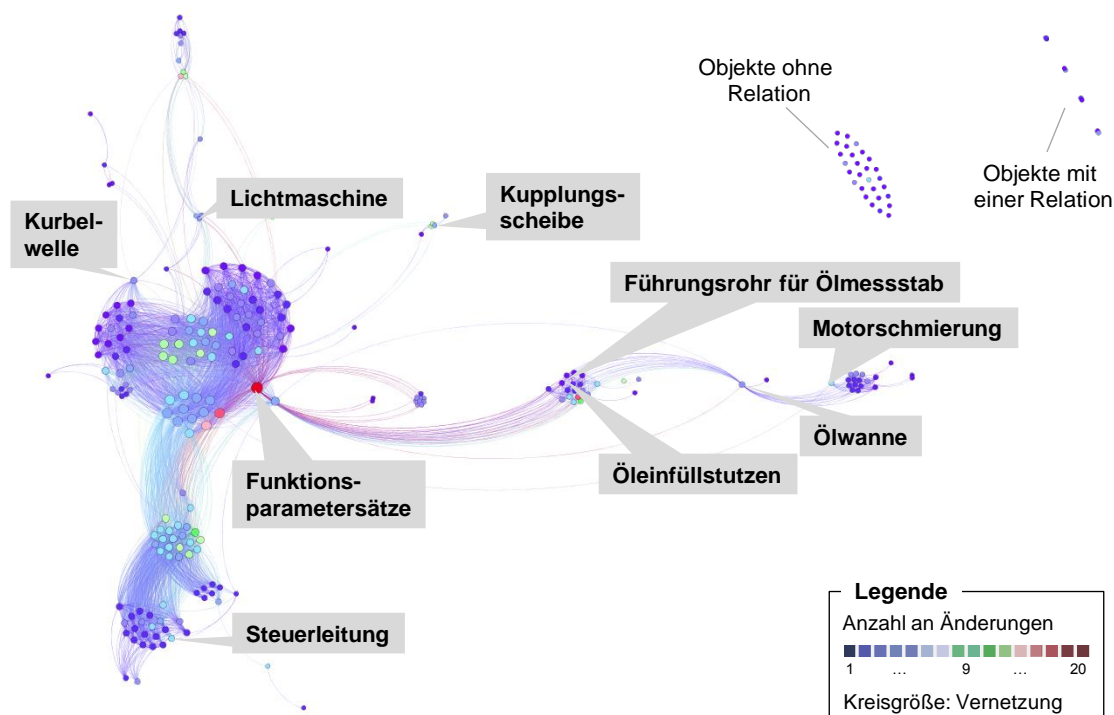


Abbildung 7-8: Abhängigkeiten zwischen Änderungsobjekten eines Motors in einer der Lebenszyklusphasen

7.3.2 A posteriori Analyse der Änderungsstruktur

Die a posteriori Analyse dient der systematischen Analyse der Änderungsstruktur des Sechszylinderdieselmotors unter Verwendung lokaler und globaler Strukturmerkmale (vgl. Kapitel

6.3.2). Tabelle 7-9 listet die globalen Strukturmerkmale der Änderungsstruktur für die einzelnen Lebenszyklusabschnitte auf und stellt damit Informationen über die Gesamtstruktur von Änderungen und Motorkomponenten bereit.

Tabelle 7-9: Globale Strukturmerkmale der Änderungen in den drei Lebenszyklusphasen des Motors

	Serienbe- treuung Motor R6	Entwick- lung Motor R6+	Serienbe- treuung Motor R6+
Anzahl der Knoten (Domäne Änderungen)	313	111	85
Anzahl der Knoten (Domäne Änderungsobjekte)	285	180	180
Kanten zwischen Änderungen und Bauteilen	977	332	305
Kanten zwischen Bauteilen	9.455	3.762	4.664
Ø Knotengrad Änderungen (Änderungs-DMM)	3	3	4
Ø Knotengrad Bauteile (Bauteile-DSM)	32,2	19,9	24,9
Ø Knotengrad Bauteile (Änderungs-DMM)	3	2	2

Durch die Anwendung von lokalen Strukturmerkmalen konnten anschließend einzelne Änderungen und Motorkomponenten identifiziert werden, die für eine Anwendung von Änderungsstrategien von Bedeutung sind. In dieser Arbeit sind nur Auszüge dieser Ergebnisse dargestellt.

Abbildung 7-9 zeigt ein Portfolio, das über den lokalen Knotengrad, der die Vernetzung von Komponenten repräsentiert, und der Änderungshäufigkeit aufgespannt wird.

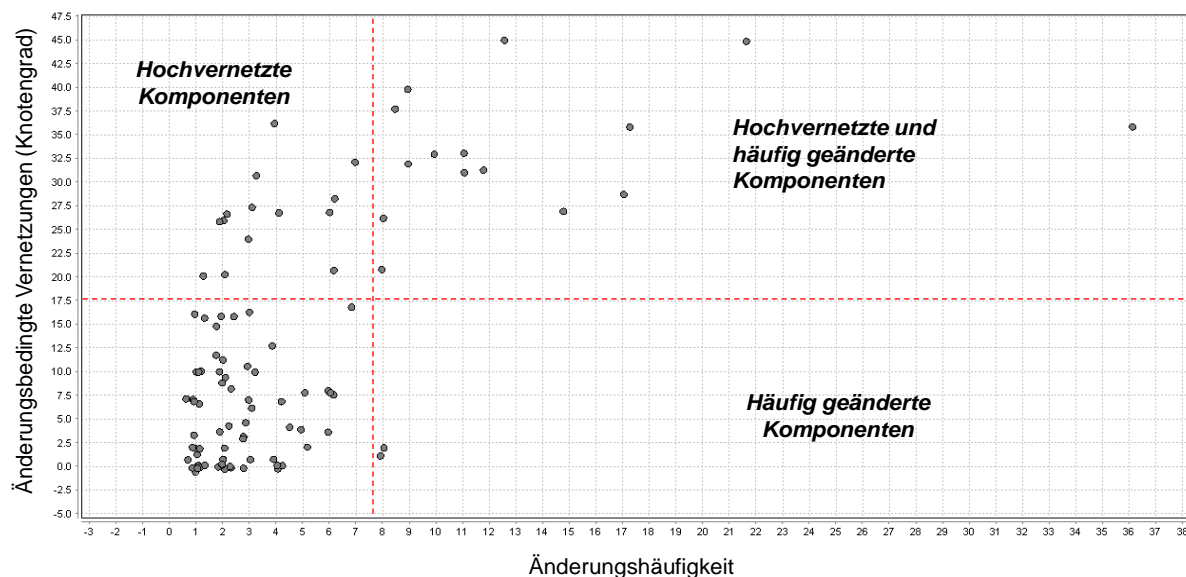


Abbildung 7-9: Änderungsbedingte Vernetzung und Änderungshäufigkeit von Komponenten in der Serienbetreuung von Motor R6

Im rechten oberen Feld finden sich die Komponenten mit großem Einfluss in der Änderungsstruktur wieder, die in zukünftigen Entwicklungsprojekten vermieden oder vorverlagert werden

sollten. Zudem eignet sich eine Reduktion der änderungsbedingten Abhängigkeiten, um eine geringere Änderungsausbreitung bei Änderungen dieser Komponenten zu erlangen. Auf eine Benennung der Komponenten musste aus Geheimhaltungsgründen verzichtet werden.

In einem weiteren Schritt wurde die Analyse der aktuellen Modulstruktur vorgenommen, um die Änderungsvernetzung über eine Modularisierungsstrategie zu reduzieren. Hierzu wurden die Module und deren Zuordnung zu Komponenten mit in die Analyse aufgenommen. Dadurch konnten änderungsbedingte Abhängigkeiten innerhalb der Module (intra-Modul Vernetzung) und zwischen Modulen (inter-Modul Vernetzung) auf Basis der Komponentenvernetzung identifiziert werden. In Abbildung 7-10 ist die anhand der Modulzuordnung geclusterte Komponenten DSM mit den änderungsbedingten Abhängigkeiten dargestellt. Die farbliche Kennzeichnung gibt Aufschluss über die Änderungshäufigkeiten.

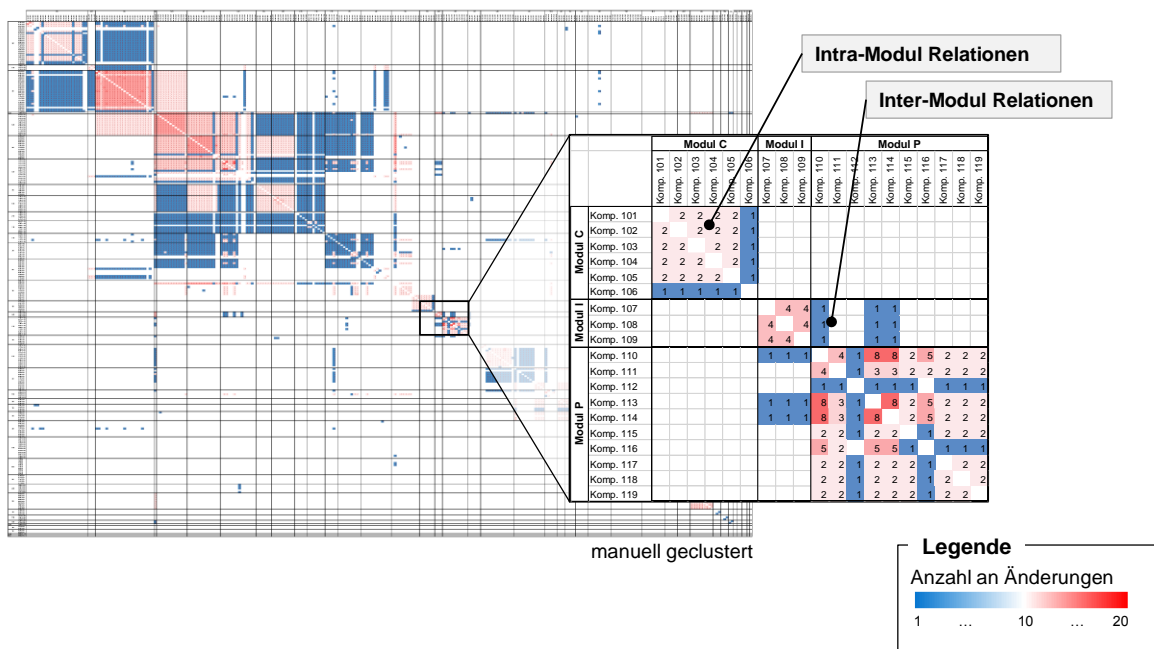


Abbildung 7-10: Identifikation von Inter- und Intra-Modul Relationen in der Produktstruktur des Motors

Die Visualisierung zeigt, dass eine höhere Änderungshäufigkeit und -vernetzung innerhalb von Modulen existiert. Dies wird ersichtlich indem Abhängigkeiten überwiegend an der Diagonalen auftreten, eine höhere Änderungshäufigkeit aufweisen und der Clustering nach Modulen folgen. Ein solches Änderungsausbreitungsverhalten wird als sehr positiv für eine Produktstruktur bewertet. Dennoch ist auch zu erkennen, dass einige Module eine starke inter-Modulvernetzung aufweisen. Diese Vernetzungen sollten in weiteren Entwicklungen stärker entkoppelt werden, um unabhängige Module zu erhalten und eine Änderungsausbreitung über Modulgrenzen hinaus zu vermeiden.

7.3.3 A priori Analyse der Änderungsausbreitung

Analog zur ersten Fallstudie wurden für die Dieselmotorenentwicklung die Änderungsregeln unter Anwendung der in Kapitel 6.4.2 beschriebenen Schritte erhoben.

Auswahl der Änderungsdaten: Die Auswahl beschränkte sich auf Änderungen aus der ersten Serienbetreuung des Dieselmotors und die davon betroffenen Bauteile. Auf diese Weise wurden in Summe 313 Änderungen und 285 Bauteile für die Regelgenerierung ausgewählt.

Maßzahlen zur Regelbestimmung: Der minimale Support wurde mit 0,020 angesetzt, wodurch Bauteile mindestens 7-mal gemeinsam Umfang von Änderungen in der Serienbetreuung des Motors sein mussten, um in den Regeln berücksichtigt zu werden. Der Konfidenz wird auf eins gesetzt um eine geringe Anzahl an relevanten Regeln zu erhalten. Durch die Anwendung des FP-growth Algorithmus und der Generierung der Änderungsregeln in RapidMiner werden zehn Regeln unter Angabe von Konfidenz, Support, Lift und ermittelt (s. Tabelle 10-12 im Anhang).

Priorisierung der Regeln: Die Reihenfolge der Regeln richtete sich nach der in Kapitel 6.4.2 beschriebenen Priorisierung. Diese bezieht sich auf übereinstimmende Bauteile in der Prämisse sowie dem Konfidenz- und Liftwert einer Regel.

Evaluation der Regeln: Die Evaluation dient der Überprüfung der erzeugten Änderungsregeln bezüglich deren Vorhersagegüte. Von Vorteil ist es, wenn weitere Änderungsdaten vorliegen, anhand derer diese überprüft und Werte für die Maßzahlen optimiert werden können. Hierfür wurden die Änderungsdaten aus der zweiten Serienbetreuung des Dieselmotors verwendet. Aus der Regelanwendung ergaben sich vier verschiedene Fälle (vgl. Kapitel 3.2), deren Häufigkeiten in Tabelle 7-7 dargestellt sind.

Tabelle 7-10: Konfusionsmatrizen der Regelanwendung für Motor R6+ (min. Konfidenz 1,0 und Support 0,020)

	Konklusion tritt ein	Konklusion tritt nicht ein
Prämisse liegt vor (tp+fp)	tp=15	fp=0
Prämisse liegt nicht vor (fn+tn)	fn=5	tn=285

Die folgende Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Wahl der minimalen Konfidenz- und Supportwerte unter Verwendung der ROC-Analyse verbessert werden konnte. Verdeutlicht wird dies im ROC-Diagramm zur Anwendung von Regel aus der Serienbetreuung von Motor R6 in der Serienbetreuung von Motor R6+ (s. Abbildung 7-11). So konnte die true-positive-Rate von 0,750 auf 0,777 erhöht werden. Damit liegt der Wert deutlich über der Diagonalen und signalisiert eine sehr gute Vorhersagegüte, da viel häufiger richtige als falsche Aussagen getroffen wurden. Die vollständige Auswertung ist im Anhang in Tabelle 10-13 zu finden.

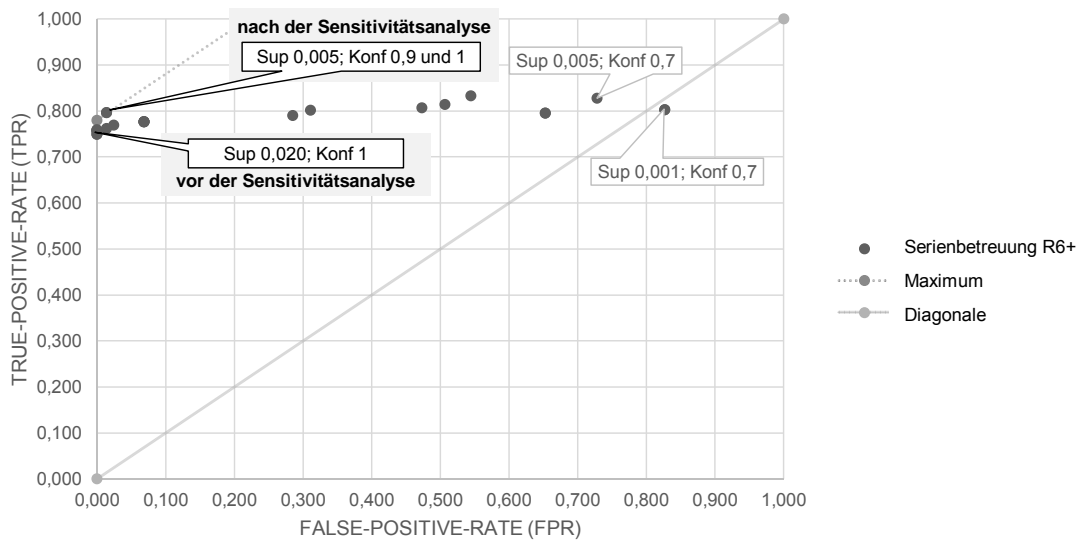


Abbildung 7-11: ROC-Diagramm der Regelanwendung der Serienbetreuung von Motor R6 auf R6+

7.4 Anwendungsevaluation

Die entwickelte Methodik ist insbesondere für ein komplexes Produktumfeld mit vielen änderungsbedingten Abhängigkeiten und Änderungen vorgesehen, wobei alle Analysen auf verfügbare Änderungsdaten aufbauen. In der Anwendungsevaluation dieser Methodik sollte vorrangig deren Verwendung in ihrem Einsatzgebiet sowie die Erzielung der erwarteten Ergebnisse nachgewiesen werden.

Für die Evaluation der Anwendbarkeit in komplexen Produktentwicklungen wurden zwei Fallstudien mit jeweils drei unterschiedlichen Änderungsdatensätzen durchgeführt; eine in der Automobil- und eine in der Dieselmotorenentwicklung. Die Datensätze stammten in der ersten Fallstudie aus unterschiedlichen Fahrzeugprojekten einer Baureihe. In der zweiten Fallstudie resultierten die Änderungsdaten von einem Dieselmotor in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen (Serienbetreuung und Weiterentwicklung).

Wie im vorangegangenen Kapitel zum Einsatz der Methodik gezeigt wurde, war in beiden Fallstudien eine Anwendung möglich. Es wurden aus den Daten quantifizierte Änderungsabhängigkeiten zwischen Komponenten und Baugruppen ermittelt und als Änderungsstruktur modelliert (Baustein 1 der Methodik). Ebenso konnten in der nachfolgenden a posteriori Analyse für beide Fallstudien auffällige Komponenten und Baugruppen mittels Strukturmerkmalen identifiziert werden, die Handlungsfelder für die Strategien der Vermeidung und Vorverlagerung darstellen (Baustein 2 der Methodik). Die Vorhersage der Änderungsausbreitung auf Basis der identifizierten Zusammenhänge erwies sich für die Fallstudien ebenfalls als möglich, da eine ausreichende Ähnlichkeit zwischen den Baureihen bzw. innerhalb der Lebenszyklusphasen vorlag (Baustein 3 der Methodik). Während die erste Fallstudie von der Autorin selbst durchgeführt wurde, wurde die Anwendung der Methodik in der zweiten Fallstudie mit Ausnahme

der Workshops in den Unternehmen maßgeblich von einer studentischen Hilfskraft durchgeführt. Auf diese Weise konnte die prinzipielle Anwendbarkeit durch eine dritte Person nachgewiesen werden.

Tabelle 7-11 zeigt den Aufwand für die einzelnen Bausteine der Methodik, der für die beschriebenen Aktivitäten in den beiden Fallstudien entstanden ist. Hierbei wurde zwischen Workshops mit den Unternehmen sowie dem Aufwand, der am Lehrstuhl von der Autorin bzw. der studentischen Hilfskraft aufgebracht wurde, differenziert. Ebenso wurde zwischen dem Aufwand für die erste Analyse eines Projekts und nachfolgenden Analysen von weiteren Projekten unterschieden, da diese durch eine Übernahme von Teilprozessschritten einen deutlich reduzierten Aufwand erfordern.

Der resultierende Gesamtaufwand für das erste Entwicklungsprojekt betrug 24,5 und 33 Stunden (Fallstudie 1 bzw. 2). Für die Analyse weiterer Entwicklungsprojekte entstanden Aufwände von 6 Stunden je Fallstudie und Projekt. Der Aufwand für die Methodik wird damit als relativ niedrig angesehen, insbesondere da die Anwendung der Methodik auf nachfolgende Projekte nur wenige Stunden in Anspruch nahm. Insgesamt kann die Anwendungsevaluation daher als sehr positiv bewertet werden.

Tabelle 7-11: Aufwände für die Anwendung der Methodik

	Anzahl Personen		Benötigter Zeitbedarf: ein Entwicklungsprojekt		Benötigter Zeitbedarf: weitere Projekte	
	Fallstudie 1	Fallstudie 2	Fallstudie 1	Fallstudie 2	Fallstudie 1	Fallstudie 2
Baustein 1	2 / 2 und 1	2 / 5 und 3	12 h 45 min / 4 h	11 h 45 min / 13,5 h	+2 h 45 min / + 0 h	+ 2 h 45 min / + 0 h
Baustein 2	2	2	2 h	2 h	+ 2 h	+ 2 h
Baustein 3	2	2	5 h 45 min	5 h 45 min	+ 1 h 15 min	+ 1 h 15 min
Summe			24 h 30 min	33 h	+ 6 h	+ 6 h

Legende: Tätigkeit am Lehrstuhl für PE / Workshop 1 und 2 in den Unternehmen

7.5 Erfolgsevaluation

Die übergeordnete Zielsetzung der Methodik besteht darin, ein verbessertes Änderungsmanagement zu ermöglichen, das sich durch weniger und frühere sowie eine schnellere und aufwandsarme Umsetzung von relevanten Änderungen auszeichnet.

Um den Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten Methodik hinsichtlich dieser Zielgrößen zu erbringen, wäre ein Pilotprojekt in einem Unternehmen erforderlich. Da dies für Unternehmen einen großen Aufwand darstellt, ein unternehmerisches Risiko beinhaltet und der Einsatz über eine gewisse Zeitdauer erfolgen sollte, um letztendlich aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, ist die Durchführung einer solchen Erfolgsevaluation für ein Forschungsvorhaben häufig nicht begründbar. Um diese Problematik zu umgehen werden in der Forschung üblicherweise Testgruppen eingesetzt (Blessing & Chakrabarti 2009, S. 182–195). Für einen Teil der entwickelten

Methodik – die Vorhersage der Änderungsausbreitung (Baustein 3) – eignet sich zudem eine datenbasierte Evaluation, indem auf historische Änderungsdaten eines weiteren Projekts zurückgegriffen wird. Mit diesen Änderungsdaten wird die Vorhersage von Änderungsausbreitungen über eine Simulation evaluiert.

Da Baustein 1 die Grundlage für die beiden Bausteine 2 und 3 bildet und damit lediglich als Befähiger für diese Bausteine auftritt, wird die Erfolgsevaluation nur über die Bausteine 2 und 3 (und damit indirekt auch über Baustein 1) realisiert.

Die Erfolgsevaluation der Methodik gliedert sich in folgende Teile:

- Datenbasierte Bewertung der Vorhersage der Änderungsausbreitung
- Workshops mit Unternehmensvertretern & Anwendung von Fragebögen
- Bewertung der Anforderungserfüllung

Durch den Einsatz unterschiedlicher Bewertungstechniken wird nach Eisenhardt (1989) eine Informationstriangulation erzeugt, die die Objektivität der Evaluationsergebnisse fördert.

Datenbasierte Bewertung der Vorhersage der Änderungsausbreitung

Die Erfolgsevaluation für die Vorhersage der Änderungsausbreitung erfolgte für beide Fallstudien datenbasiert, um eine möglichst hohe Objektivität zu erzielen. Die große Anzahl an Regelanwendungen erlaubt zudem eine statistische Auswertung.

Fallstudie 1: Automobilbranche

Im Rahmen der Evaluation wurde die Wiederverwendung der optimierten und nicht optimierten Änderungsregeln auf das dritte Entwicklungsprojekt C mit 1.944 Änderungen angewendet. Für die Regelanwendung wurde der Operator „Apply Association Rules“ in der Umgebung Rapid-Miner genutzt, um die Häufigkeiten der vier Fälle der Regelanwendung (vgl. Kapitel 3.2) im Entwicklungsprojekt C zu bestimmen.

Die Ergebnisse der Regelanwendung auf Änderungen in Projekt C sind in Tabelle 7-12 in Form der Konfusionsmatrix dargestellt. Diese enthält die Häufigkeiten der vier möglichen Kombinationen in der Regelanwendung.

Tabelle 7-12: Konfusionsmatrizen für die Regelanwendung in Projekt C (ohne und mit Sensitivitätsanalyse)

(Support=0,005 / Konfidenz=0,9)	Konklusion tritt ein	Konklusion tritt nicht ein
Prämisse liegt vor (tp+fp)	tp=12	fp=1
Prämisse liegt nicht vor (fn+tn)	fn=6	tn=1777
(Support=0,001 / Konfidenz=0,5)	Konklusion tritt ein	Konklusion tritt nicht ein
Prämisse liegt vor (tp+fp)	tp=68	fp=176
Prämisse liegt nicht vor (fn+tn)	fn=562	tn=1165

Indem die Werte der Konfusionsmatrix zueinander ins Verhältnis gesetzt werden ergeben sich wichtige Kennwerte, die für eine Bewertung herangezogen werden können. Powers (2011)

empfiehlt hierfür die in Kapitel 3.2 vorgestellten Kennwerte. Tabelle 7-13 stellt diese für die Regelanwendung auf Änderungen in Entwicklungsprojekt C dar.

Tabelle 7-13: Anwendung optimierter Regeln in Entwicklungsprojekt C

Kennwerte	Regeln mit Optimierung (Support=0,005 / Konfidenz=0,9)	Regeln ohne Optimierung (Support=0,001 / Konfidenz=0,5)
true-positive Rate	0,667	0,108
false-positive Rate	0,001	0,131
Relevanz	0,923	0,279
Richtigkeit	0,996	0,626
Spezifität	0,999	0,869

Tabelle 7-13 zeigt die erfolgreiche Anwendung der Änderungsregeln auf ein nachfolgendes Entwicklungsprojekt in Fallstudie 1, wobei insbesondere die durchgeführte Regelloptimierung mit Daten aus Projekt B die Kennwerte stark verbesserte (mittlere Spalte). Die true-positive-Rate ohne Sensitivitätsanalyse zeigt, dass in 10,8 % der Fälle, in denen die Prämisse einer Regel auftritt, auch die Konklusion eintritt. Mit der Sensitivitätsanalyse steigt diese true-positive-Rate auf 66,7 %. Die false-positive-Rate ohne Sensitivitätsanalyse besagt, dass in 13,1 % der Änderungen, in denen keine Prämisse vorliegt, die Konklusion der Änderungsregel eintritt. Mit Sensitivitätsanalyse sinkt der Wert der false-positive-Rate auf 0,1 %.

Die Relevanz (ohne Sensitivitätsanalyse) besagt, dass in 27,9 % der Änderungen, in denen eine Konklusion auftritt, die Regel eine richtige Vorhersage traf. Durch die Sensitivitätsanalyse konnte dieser Wert auf 92,3 % erhöht werden. Die Richtigkeit (ohne Sensitivitätsanalyse) zeigt, dass lediglich für 63 % der Änderungen eine richtige Regelanwendung stattfand. Durch den angepassten Support- und Konfidenzwert wurde eine Richtigkeit von 99,6 % erzielt. Die Spezifität verdeutlicht, dass ohne Sensitivitätsanalyse in 87 % der Änderungen, in denen eine Prämisse nicht auftritt auch die Konklusion nicht eintritt. Mit der Sensitivitätsanalyse konnte eine Spezifität von 99,9 % erreicht werden.

Durch die Sensitivitätsanalyse können die Kennzahlen stark verbessert werden, allerdings wird in der Konfusionsmatrix auch ersichtlich, dass die absolute Anzahl der true-positive Fälle, d. h. die Fälle, in denen Regeln richtig angewendet werden, sinkt. Dies resultiert aus einer geringeren Regelbasis, die in weniger Änderungsfällen eingesetzt werden kann.

Fallstudie 2: Nutzfahrzeugbranche

In der Fallstudie 2 werden die nicht optimierten Änderungsregeln⁴³ aus der ersten Lebenszyklusphase des Dieselmotors auf die dritte Lebenszyklusphase angewendet. Beide Phasen umfassen die Serienbetreuung des Dieselmotors. Hierzu wurde die Wiederverwendung der Änderungsregeln auf die Serienbetreuung des weiterentwickelten Motors analysiert. Diese umfasst 85 Änderungen. Die Ergebnisse der Regelanwendung sind in Tabelle 7-14 in der Konfusionsmatrix für die günstigsten Support- und Konfidenzwerte dargestellt.

⁴³ In der Fallstudie 2 fand keine Optimierung der Änderungsregeln statt (vgl. Kapitel 7.3.3).

Tabelle 7-14: Konfusionsmatrix für die Regelanwendung in der Serienbetreuung von Motor R6+

(Support=0,001 / Konfidenz=0,9)	Konklusion tritt ein	Konklusion tritt nicht ein
Prämisse liegt vor (tp+fp)	tp=205	fp=3
Prämisse liegt nicht vor (fn+tn)	fn=59	tn=41

Aus der Konfusionsmatrix wurden die Kennwerte für die Bewertung ermittelt (s. Tabelle 7-15).

Tabelle 7-15: Kennwerte für die Regelanwendung in der Serienbetreuung von Motor R6+

Kennwerte	Regeln (Support=0,001 / Konfidenz=0,9)
true-positive Rate	0,777
false-positive Rate	0,068
Relevanz	0,986
Richtigkeit	0,799
Spezifität	0,932

Die true-positive-Rate zeigt, dass in 77,7 % der Fälle, in denen die Prämisse einer Regel auftrat, auch die Konklusion eingetreten ist. Die false-positive-Rate hingegen zeigt, dass in 6,8 % der Änderungen, in denen keine Prämisse vorlag, die Konklusion der Änderungsregel eingetreten ist. Die Relevanz besagt, dass in 98,6 % der Änderungen, in denen eine Konklusion auftritt, die Regel eine richtige Vorhersage machte. Die Richtigkeit zeigt, dass in 79,9 % der Änderungen eine richtige Regelanwendung stattfand. Die Spezifität verdeutlicht, dass in 93,2 % der Änderungen, in denen eine Prämisse nicht aufgetreten ist auch die Konklusion nicht eintritt.

Die Anwendung von Änderungsregeln innerhalb der Fallstudien 1 und 2 erweist sich als durchweg positiv. Dies zeigen insbesondere die Kennwerte der Richtigkeit (99,6 % bzw. 79,9 %), Relevanz (92,3 % bzw. 98,6 %) und Spezifität (99,9 % bzw. 93,2 %). Die Regeln eignen sich in beiden Fallstudien sehr gut zur Vorhersage der Änderungsausbreitung insbesondere nach der Sensitivitätsanalyse.

Workshops mit Unternehmensvertretern & Anwendung von Fragebögen

Im Rahmen der Fallstudien wurden Workshops mit mehreren Unternehmensvertretern durchgeführt, um über die reine Anwendung der Methodik hinaus die Erreichung der Zielsetzung zu bewerten. Hierzu wurden Workshops organisiert, innerhalb derer die Methodik und die unternehmensspezifischen Resultate aus der Anwendung vorgestellt wurden. Anschließend fand eine Diskussion anhand von neun Aussagen und Leitfragen statt, die schließlich von den Teilnehmern einzeln entsprechend ihrer Erfahrung im Unternehmen bewertet bzw. beantwortet wurden. Die Workshop-Teilnehmer hatten teilweise bereits in der Anwendung der Methodik mitgewirkt, teilweise war der Teilnehmerkreis auch „neu“ und damit unbefangen. Die Unternehmensvertreter stammten aus folgenden Unternehmensbereichen: Entwicklung & Konstruktion, Produktarchitektur und Stückliste. Jeder Workshop dauerte zwischen zwei und drei Stunden und wurde mittels Audiorekorder aufgezeichnet. Die expertenbasierte Evaluation der Methodik umfasst demnach die Diskussion der Aussagen und Leitfragen während des Workshops sowie die Auswertung der Fragebögen.

Tabelle 7-16 zeigt die Auswertung der Fragebögen in Form eines arithmetischen Mittels sowie der Spannweite der Bewertungen.

Tabelle 7-16: Bewertung der Annahmen der Methodik in zwei Workshops mit insgesamt acht Teilnehmern

	1	2	3	4	5
1. Produktstruktur und Entwicklungsprozess sind hinreichend stabil, so dass änderungsbedingte Zusammenhänge in nachfolgenden Entwicklungen wiederverwendet werden können.					
2. Zwischen Änderungsobjekten kann ein Zusammenhang angenommen werden, wenn diese gemeinsam Umfang einer Änderung sind.					
3. Die für die Methodik benötigten technischen Änderungs- und Produktdaten liegen strukturiert und dokumentiert vor.					
4. Die Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen ermöglicht einen verbesserten Umgang mit Änderungen in ihrem Unternehmen.					
5. Durch die Methodik können relevante/neue änderungsbedingte Abhängigkeiten identifiziert werden.					
6. Die Methodik stellt eine neue Möglichkeit zum Umgang mit Änderungen in ihrem Unternehmen dar und ergänzt sinnvoll aktuelle Methoden.					

Legende: 1 – trifft voll zu | 2 – trifft zu | 3 – teilweise | 4 – trifft eher nicht zu | 5 – trifft nicht zu

Aus der Diskussion in den Workshops ergaben sich einige interessante und ergänzende Aspekte zu den Aussagen 1 – 6 in Tabelle 7-16.

Die Produktstruktur der Unternehmen wurde in beiden Workshops als überaus stabil bewertet. Prinzipielle Zusammenhänge zwischen Komponenten bleiben nach Experteneinschätzung auch in nachfolgenden Produktgenerationen bestehen. Strukturelle Veränderungen erfolgen normalerweise nicht disruptiv, sondern nach und nach in langen Zyklen, so dass von einer Wiederverwendbarkeit von Änderungszusammenhängen ausgegangen werden kann. Laut eines Teilnehmers können allerdings Ausnahmesituationen zu erheblichen Veränderungen in der Produkt- und Prozessstruktur führen (bspw. eine Unternehmenszusammenführung).

Die Aussage, dass Änderungsobjekte eine Relation aufweisen, wenn diese gemeinsam Umfang einer Änderung sind, hat die höchste Divergenz in den Antworten erzeugt. In einem Workshop wurde dies als überwiegend voll zutreffend – im verbleibenden Workshop als nur teilweise zu-

treffend bewertet. In den Diskussionen wurde deutlich, dass in einem Unternehmen Komponenten teilweise gemeinsam geändert werden, obwohl kein gemeinsamer Grund obliegt. Eine gemeinsame Änderung kann bspw. erfolgen, da es sich zeitlich und organisatorisch anbietet. In dem anderen Unternehmen sind Änderungen nur möglich, wenn diese eine technische Zusammengehörigkeit aufweisen. Dies wird im Rahmen des Änderungsprozesses sichergestellt.

Die Teilnehmer stimmen überwiegend zu, dass durch die Methodik interessante und auch neue Erkenntnisse über Abhängigkeiten in der Produktstruktur gewonnen werden können. Sie nannten zudem die ganzheitliche Betrachtung der Änderungsstruktur als großen Mehrwert, da dadurch eine Ausbreitungsbetrachtung über verschiedene Komponenten hinweg unterstützt wird, die sonst nur schwer oder nicht zu überblicken ist.

Die Methodik schließt eine Lücke in den Unternehmen. Es gibt bisher keinen vergleichbaren Ansatz, der die datenbasierte Analyse von Änderungsausbreitungen adressiert. Ein Teilnehmer fügte an, dass der Ansatz ergänzend verwendet werden kann, um eine „Landkarte technischer Abhängigkeiten“ zu erstellen. Diese Landkarte wird in einem der Unternehmen projektbezogen von einer Expertenrunde erhoben. Sie repräsentiert Abhängigkeiten in Projekten, bspw. dass die Motorlage weitere Konzept-Entscheidungen maßgeblich beeinflusst. Ein Entwickler wies darauf hin, dass die Ausbreitungsanalyse im Unternehmen derzeit stark erfahrungsbasiert ist und mögliche Zusammenhänge von den Entwicklern selbst erkannt oder erarbeitet werden müssen (bspw. durch Recherche in verschiedenen Systemen).

Die drei Fragen in Tabelle 7-17 richten sich an die Wirksamkeit der Methodik zur Erreichung der Zielgrößen: weniger und frühere Änderungen (Frage 7), weniger Änderungsausbreitungen (Frage 8) sowie eine schnellere und aufwandsärmere Änderungsabwicklung (Frage 9). Die Auswertung erfolgt über das arithmetische Mittel sowie der Spannweite der Bewertungen.

Tabelle 7-17: Bewertung der Wirksamkeit der Methodik in zwei Workshops mit insgesamt acht Teilnehmern

	1	2	3	4	5
7. Wie hilfreich schätzen Sie die Methodik ein, um in zukünftigen Entwicklungen die Änderungen zu identifizieren, die idealerweise durch geeignete Maßnahmen vorzuerlagern oder zu vermeiden sind?		◆			
8. Wie hilfreich schätzen Sie eine a posteriori Analyse der Änderungsstruktur von Entwicklungsprojekten zur Verbesserung der Produktstruktur/-architektur ein?	◆				
9. Ist eine a priori Analyse zur Vorhersage von möglichen Änderungsausbreitungen in neuen Änderungsfällen hilfreich für einen effektiven und effizienten Umgang mit Änderungen?	◆				

Legende: 1 – sehr hilfreich | 2 – hilfreich | 3 – nicht hilfreich | 4 – hinderlich | 5 – sehr hinderlich

Die Methodik wird von den Unternehmensvertretern durchgängig als sehr hilfreich bis hilfreich bewertet. Sie stellt für die Vorverlagerung und Vermeidung eine gute Grundlage bereit, indem relevante Komponenten in vergangenen Entwicklungsprojekten identifiziert werden. Über diese kann in Expertengremien zielgerichtet und effektiv diskutiert werden. Zudem nannte ein Teilnehmer die Möglichkeit, mit dem Wissen über die Vernetzung von Komponenten bereits ganze Cluster vorzuverlagern.

Ebenfalls wird die Methodik als hilfreiche Unterstützung zur Verfolgung der Modularisierungsstrategie gesehen, indem in neuen Entwicklungen auf eine bewusste Reduzierung intermodularer Relationen aus vergangenen Entwicklungen geachtet wird. Eine Verbesserung bestehender Produktstrukturen, die von der entwickelten Methodik auch nicht intendiert ist, wird von den Teilnehmern als unwahrscheinlich eingeschätzt.

Die Bereitstellung von Informationen zu möglichen Änderungsausbreitungen in einem vorliegenden Änderungsfall wird als hilfreich eingeschätzt. Ein Teilnehmer begründete dies mit der hohen Mitarbeiterfluktuation und dem damit teilweise fehlenden bzw. abwandernden Erfahrungswissen über Änderungszusammenhänge. Die Vorschläge liefern Anhaltspunkte über mögliche unerwartete Ausbreitungen. Laut Einschätzung der Teilnehmer besteht bereits ein Mehrwert, wenn lediglich 70 % der Vorschläge tatsächlich relevant sind. Die Kehrseite spiegelt sich allerdings in „falschen Fährten“ wieder, indem Zusammenhänge aus schlechten Änderungsabwicklungen ebenfalls berücksichtigt und damit vorgeschlagen werden. Daher erwägt ein Teilnehmer eine zusätzliche Kontextinformation als sinnvoll. Indes sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass über den minimalen Supportwert festgelegt wird, wie häufig ein Zusammenhänge vorliegen muss, ehe er in eine „Regel“ zur Vorhersage aufgenommen wird. Einmalige Fehlschritte werden demnach nicht berücksichtigt, systematische Fehler hingegen könnten verstärkt werden.

Allgemein wurde der Ansatz als „sehr spannend“ bewertet, da dieser nicht die physischen Zusammenhänge zwischen Änderungsobjekten berücksichtigt, sondern jegliche, die zu einer Änderungsausbreitung führen. Eines der Unternehmen bestätigte bereits, dass sie die Methodik weiterverfolgen und auf weitere Umfänge ihres Produktportfolios anwenden werden. Die Methodik soll insbesondere zur Bewertung der Produktarchitektur herangezogen werden. Ein Teilnehmer betonte die Wichtigkeit Änderungsausbreitungen zu verstehen, denn diese stellen ein Risiko für Entwicklungsprojekte dar. Aufwände können plötzlich innerhalb eines Projekts sehr viel größer werden, ohne dass diese vorher prognostiziert wurden. Dies führt oft zu großen Portfolio-Einschränkungen, denn was ursprünglich in allen Varianten eingeführt werden sollte, wird anschließend nur in einzelnen Varianten eingeführt, in denen der Aufwand vertretbar ist oder noch im Budget liegt.

7.6 Bewertung der Anforderungserfüllung

Im Rahmen der Evaluation wurde abschließend bewertet, inwiefern die entwickelte Methodik die erhobenen Anforderungen erfüllte. Die Anforderungen umfassen hierbei input-orientierte Anforderungen, Anforderungen an das Modell und die Modellierung sowie anwendungs- und ergebnisorientierte Anforderungen (vgl. Kapitel 4). Demnach decken diese sowohl Aspekte der Erfolgsevaluation als auch der Anwendungsevaluation ab.

Die Bewertung der Anforderungserfüllung wurde analog zur Bewertung der Ansätze aus dem Stand der Forschung & Technik von der Autorin dieser Arbeit vorgenommen.

Tabelle 7-18: Bewertung der entwickelten Methodik hinsichtlich der gestellten Anforderungen

Kategorie	Anforderung	Bewertung der Methodik
1. Input-orientierte Anforderungen	1.1 Breites Produktspektrum	Breite Anwendbarkeit; gezeigt in zwei industriellen Fallstudien mit komplexen Produkten (PKW und Dieselmotor).
	1.2 Verschiedene Änderungsarten	Berücksichtigung verschiedener Änderungsarten über Attribute, z. B. fehlerbedingte Änderungen.
	1.3 Verschiedene Granularitätslevel	Verschiedene Granularitätslevel werden berücksichtigt, z. B. Modul- und Komponentenlevel.
	1.4 Verwendung verfügbarer Daten u. Informationen	Verwendung von bereits vorhandenen Produkt- und Änderungsdaten.
2. Anforderungen an Modell und Modellierung	2.1 Produktmodellierung	Modellierung der Produktstruktur (über Daten aus dem PDM-System).
	2.2 Änderungsausbreitung	Modellierung von in der Vergangenheit aufgetretenen, änderungsbedingten Abhängigkeiten auf unterschiedlichen Level der Produktstruktur.
	2.3 Änderungsmodellierung	Modellierung von der Änderung mit relevanten Attributen (z. B. Zeitpunkt der Änderung).
	2.4 Genauigkeit	Statistische Berechnung der Änderungszusammenhänge.
	2.5 Konsistenz	Abhängig von der Konsistenz zugrunde liegender Daten.
	2.6 Kompatibilität	DSM basierte Methode ermöglicht Kompatibilität zu vielen weiteren Modellen und Methoden.
3. Anwendungsorientierte Anforderungen	3.1 Einfache Anwendung/Automatisierung	A priori Analyse ist teilautomatisiert und kann in Workflow-Systemen eingebunden werden; a posteriori Analyse nutzt Portfolios zur einfachen Identifikation von Handlungsfeldern.
	3.2 Verfügbarkeit benötigter Software	Benötigt werden Data Mining Programme und Tools zur Netzwerkanalyse, für die u. U. Lizenzen bezogen werden müssen.
	3.3 Industrielle Anwendbarkeit	Nachweis in zwei industriellen Fallstudien erbracht.
	3.4 Flexibilität	Hängt von der konkreten systemtechnischen Umsetzung ab. Prinzipiell könnte das Modell stets auf den aktuellen Daten basieren und damit höchste Flexibilität bieten.
4. Ergebnisorientierte Anforderungen	4.1 Nutzbarkeit der Ergebnisse	Ergebnisse sind hilfreich bis sehr hilfreich (vgl. Ergebnisse aus den Workshops mit den Unternehmen).
	4.2 Quantität der Ergebnisse	Vielfältige Einsatzmöglichkeiten der Analyseergebnisse, z. B. zur Unterstützung von Änderungskoordinatoren oder zur Verbesserung der Produktstruktur.
	4.3 Qualität der Ergebnisse	Präzise Vorhersagen in ähnlichen Produktentwicklungen (s. ROC-Analysen) wurden nachgewiesen.
	4.4 Aufwand/Nutzen-Verhältnis	Einmaliger Aufwand für die Implementierung, anschließend geringer Aufwand. Nutzen wird als hoch eingestuft.

Folgende Anforderungen sind in Bezug auf ihre Erfüllung nochmals herauszustellen, da verschiedene Aspekte zu beachten sind:

Anforderung 2.2 zur Änderungsausbreitung: Die vorliegende Methodik unterliegt der Einschränkung, dass sie nur bereits aufgetretene Abhängigkeiten in Form von Änderungen innerhalb der Produktstruktur berücksichtigt. Sind an Komponenten keine Änderungen vorgenommen worden, so konnten für diese keine Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Demnach sind die Abhängigkeiten innerhalb des Modells keinesfalls als vollständig zu bewerten, sondern eher als die relevanten, da diese bereits in Form von Änderungen aufgetreten sind.

Anforderung 3.2 zur Verfügbarkeit der Software: Der Ansatz verwendet Data Mining Programme und Programme zur Netzwerkanalyse, die nicht als Standardprogramm eingestuft werden, allerdings frei beziehbar sind. Unter Umständen werden dennoch Softwarelizenzen sowie Personalschulungen zum Umgang mit den entsprechenden Programmen erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit konnte eine kostenlose Lizenz für Forschung und Lehre für RapidMiner bezogen werden. Bei den verbleibenden benötigten Programmen R und Gephi, handelt es sich um Open Source Software.

Anforderung 3.4 zur Flexibilität: Die Flexibilität hängt stark von der systemtechnischen Umsetzung der Methodik ab. Durch eine geschickte Einbindung in die Systemlandschaft kann sich das Modell immer basierend auf den aktuellen Änderungsdaten aufbauen und aktualisieren. Ohne Einbindung müssen bei Änderungen entsprechende Teile des Systems manuell neu erhoben und zugehörige Prozessschritte neu durchlaufen werden.

Die vorliegende Methodik erfüllt alle 18 Anforderungen. Es wurde damit ein Forschungsbeitrag zur integrierten Änderungs-, Produkt- und Ausbreitungsmodellierung geschaffen unter ausdrücklicher Berücksichtigung der industriellen Anwendbarkeit.

7.7 Zusammenfassung der Evaluation

Basierend auf zwei umfangreichen Fallstudien mit Unternehmen aus der Automobil- und Nutzfahrzeugbranche wurde in diesem Kapitel die Evaluation der entwickelten Methodik dargelegt. In beiden Fallstudien kamen Änderungsdaten aus jeweils drei Projekten zum Einsatz, die sich auf Änderungen in der Entwicklung und Serienbetreuung bezogen. Die zugrunde liegenden Produkte, ein PKW bzw. ein Dieselmotor, sind komplexe technische Systeme und von einer Vielzahl an Änderungen betroffen. Die durchgeführte Evaluation umfasst sowohl eine Anwendungs- als auch eine Erfolgsevaluation.

In beiden Fallstudien konnte anhand des entwickelten Vorgehens und unter Verwendung von Änderungsdaten ein Änderungsstrukturmodell erstellt werden, das neben Änderungsobjekten sowohl Änderungshäufigkeiten als auch Wahrscheinlichkeiten für eine Änderungsausbreitung beinhaltet. Anhand der anschließenden a posteriori Analyse wurden relevante Änderungsstrukturen identifiziert und hinsichtlich einer Maßnahmenauswahl unterstützt um zukünftig weniger und frühere Änderungen zu erzielen. Die a priori Analyse wurde simulationsbasiert bewertet, indem Änderungszusammenhänge in Form von Regeln aus einem Projekt auf ein nachfolgendes angewendet wurden. Bewertet wurde, inwiefern Vorhersagen richtige Ergebnisse bezüglich einer Änderungsausbreitung lieferten. Die Ergebnisse waren insbesondere nach einer Sensibi-

litätsanalyse überaus positiv hinsichtlich der Kennwerte Richtigkeit (99,6 % bzw. 79,9 %), Relevanz (92,3 % bzw. 98,6 %) und Spezifität (99,9 % bzw. 93,2 %). Die Anwendung der Methodik für ein Projekt erforderte insgesamt 24,5 – 33 Personenstunden, für jedes weitere Projekt werden ca. sechs Personenstunden benötigt.

Die anschließenden Workshops mit Experten aus den Unternehmen, mit denen auch die Fallstudien durchgeführt wurden, dienten der Erfolgsevaluation der entwickelten Methodik. Basierend auf einem Fragebogen sowie einer Diskussion wurde diese hinsichtlich der Zielsetzung anhand von neun Aussagen und Fragen mit acht Experten bewertet. Die Methodik wurde insgesamt als sehr hilfreich bis hilfreich bewertet. Kleinere Einschränkungen wurden in einem der Unternehmen hinsichtlich der Annahme diskutiert, dass Änderungsobjekte eine Relation aufweisen, wenn diese gemeinsam Umfang einer Änderung sind. Dies möge ggf. nicht für alle Änderungen immer zutreffend sein. Als sehr positiv wurde die Identifikation von Zusammenhängen bewertet, die über die rein physischen Abhängigkeiten hinausgehen, da diese leicht übersehen werden können. Weiterhin wurde die bewusste Bündelung und Vorverlagerung aufgrund einer starken Vernetzung von Änderungsobjekten als Mehrwert erachtet. Mitarbeiter, die sich mit der Produktarchitektur innerhalb eines Unternehmens beschäftigen, zeigten zudem großes Interesse an der Weiterverfolgung des Ansatzes zur Bewertung ihrer aktuellen Modulstruktur.

Abschließend fand die Bewertung der Methodik anhand der gestellten Anforderungen statt. Gegenüber bestehenden Ansätzen aus dem Stand der Forschung und Technik zeichnet sich die Methodik insbesondere durch die integrierte Änderungs-, Produkt- und Ausbreitungsmodellierung aus, die zahlreiche quantifizierte und differenzierte Analysen ermöglicht.

Insgesamt lieferte die Anwendungs- und Erfolgsevaluation der Methodik ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis. Die Anwendbarkeit wurde in zwei Fallstudien anhand komplexer Produktentwicklungen nachgewiesen. Die Methodik wurde von den Unternehmen als hilfreich für das Änderungsmanagement eingestuft, um weniger, frühere sowie effiziente und effektive Änderungen zu erzielen.

8. Zusammenfassung & Ausblick

Dieses Kapitel fasst abschließend das Forschungsvorhaben und den erzielten Ergebnisbeitrag dieser Arbeit zusammen. Darüber hinaus werden Limitationen der Methodik aufgezeigt und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten gegeben.

8.1 Zusammenfassung des Forschungsvorhabens

Die steigende Komplexität technischer Produkte und Produktportfolios erschwert den Umgang mit technischen Änderungen. Aufgrund vielfältiger produkt- und prozessbezogener Abhängigkeiten führen Änderungen an einer Komponente häufig zu Änderungen an weiteren Komponenten und breiten sich so innerhalb der Produktstruktur aus. Da Produktstrukturen und -abhängigkeiten über verschiedene Produktgenerationen hinweg stabil bleiben, können diese bei einem gut definierten Entwicklungsprozess in neuen Entwicklungsprojekten wiederverwendet werden.

Die Zielsetzung dieser Arbeit bestand darin, diese Abhängigkeiten in der Produktstruktur zu identifizieren und zu modellieren, um sie für einen verbesserten Umgang mit technischen Änderungen in neuen Entwicklungsprojekten einzusetzen. Hierfür wurde ein **forschungsmethodisches Vorgehen** orientiert an der „Design Research Methodology“ angewendet. Zunächst wurden zur Klärung der Forschungsziele die theoretischen und methodischen Grundlagen im Änderungsmanagement erarbeitet und die in dieser Arbeit verwendeten Terminologien definiert. Für diese Arbeit wesentlich sind Methoden zur Strukturmodellierung sowie Data Mining Verfahren zur Identifikation von Strukturen in großen Datenmengen, da diese die Grundlage für die Identifikation und Modellierung der änderungsbedingten Abhängigkeiten in der Produkt- und Portfoliostruktur darstellen. Daran anschließend wurden die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik und auf Basis einer tiefergehenden Literaturanalyse bereits existierende Ansätze mit gleicher Zielsetzung detailliert beschrieben. Des Weiteren wurden Unterschiede zwischen diesen Ansätzen herausgearbeitet, ein Abgleich mit den erhobenen Anforderungen durchgeführt und daraus der Forschungsbedarf abgeleitet.

Die in dieser Arbeit entwickelte **Methodik zur Analyse technischer Änderungen** besteht aus drei Bausteinen, die zum Teil aufeinander aufbauen. Der **erste Baustein** stellt die Grundlage für die beiden nachfolgenden Analysebausteine dar, die unabhängig voneinander anwendbar sind. Der erste Baustein stellt ein Vorgehen zur Identifikation und Modellierung von änderungsbedingten Abhängigkeiten bereit und involviert hierzu Data Mining Verfahren bzw. eine MDM Modellierung. Über einen semi-automatischen Prozess werden quantifizierte Abhängigkeiten aus umfangreichen Änderungsdaten erhoben, Änderungshäufigkeiten ermittelt und mit Hilfe von MDMs modelliert sowie als Graph dargestellt. Der **zweite Baustein** adressiert die Analyse der Änderungsstruktur hinsichtlich relevanter Abhängigkeiten, die in zukünftigen Entwicklungsprojekten zielgerichtet zur Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen eingesetzt werden können. Im Fokus stehen hierbei aus der Änderungsstruktur hervorgehende hochvernetzte und häufig geänderte Komponenten, auf deren strukturelles Verhalten über verschiedene Maßnahmen Einfluss genommen werden kann. Der **dritte Baustein** unterstützt

den Änderungskoordinator in laufenden Änderungsprozessen bei der Bestimmung des Änderungsumfangs, indem basierend auf ermittelten Ausbreitungswahrscheinlichkeiten aus vergangene Änderungen mögliche betroffene Komponenten vorgeschlagen werden. Für die technische Umsetzung wird die Einbindung in bestehende Workflow-Systeme vorgesehen, wodurch auf getätigte Änderungseingaben zurückgegriffen werden kann und unterstützt durch selbstlernende Algorithmen die Vorschläge zur Änderungsausbreitung stetig verbessert werden. Damit bewirkt der dritte Baustein eine erhöhte Effizienz und Effektivität im Änderungsprozess, indem weniger Aufwand und Zeit für eine Ausbreitungsanalyse benötigt wird und seltener Iterationen im Änderungsprozess auftreten.

Zur Bewertung der Methodik wurde eine **Anwendungs- und Erfolgsevaluation** vorgenommen. In zwei Unternehmen und anhand von sechs unterschiedlichen Änderungsdatensätzen wurde die Methodik angewendet. Die Datensätze stammten aus drei Fahrzeugentwicklungsprojekten sowie drei Lebenszyklusphasen eines Dieselmotors. Hierbei konnte die erfolgreiche Anwendung aller Bausteine für komplexe Produkte nachgewiesen werden. Durch Interviews und Workshops mit Unternehmensvertreten sowie einer datenbasierten Anwendung von Änderungsregeln wurde zudem bewertet, inwiefern die übergeordnete Zielsetzung durch die Methodik erreicht wurde. Die Methodik wurde von den Workshop-Teilnehmern als hilfreich bewertet, um die richtigen Änderungen vorzuverlagern und zu vermeiden, indem Handlungsfelder für zukünftige Projekte aufgezeigt werden. Darüber hinaus führt die Visualisierung von Abhängigkeiten zu einem erhöhten Verständnis über Änderungszusammenhänge, die selten ohne methodische Unterstützung über verschiedene Komponenten hinweg überblickt werden. Die entwickelte Methodik wird als zielführend für eine Steigerung der Effizienz und Effektivität im Änderungsprozess bewertet, indem dem Änderungskoordinator relevante Ausbreitungsmöglichkeiten aus der Vergangenheit vorgeschlagen werden, wodurch weniger Abhängigkeiten übersehen und Iterationen vermieden werden können.

8.2 Ergebnisbeitrag für Forschung und Industrie

Im Folgenden wird auf den Ergebnisbeitrag der vorliegenden Arbeit für Forschung und Industrie eingegangen.

Forschungsbeitrag

Die vorliegende Forschungsarbeit nutzt als einer der wenigen Ansätze im Änderungsmanagement Data Mining Verfahren (vgl. Tabelle 10-3 im Anhang). Dies ermöglicht die Analyse weit komplexerer technischer Systeme als bisher, auf einem detaillierten Level der Produktstruktur, da änderungsbedingte Zusammenhänge in der Produktstruktur automatisiert erhoben werden.

Die Forschungsarbeit adressiert erstmals die automatisierte und datenbasierte Identifikation quantifizierter Zusammenhänge in Form von Häufigkeiten und Wahrscheinlichkeiten, um auf diese Weise Änderungsausbreitungsmodelle zu erstellen. Dabei werden verschiedene Änderungsarten sowie Granularitätslevel in der Methodik berücksichtigt. Als Resultat steht erstmalig eine Alternative zu den bisher verfügbaren, interviewbasierten Erhebungen von Abhängigkeiten zur Verfügung. Da der Aufwand in den interviewbasierten Ansätzen stark von der Anzahl betrachteter Elemente und Relationsarten bestimmt wird, werden bestehende Ansätze häufig

nur für wenig komplexe Produkte oder auf einer relativ hohen Produktstrukturebene verwendet. Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik lässt sich dieser Aufwand nun signifikant reduzieren, so dass auch die Analyse jener Systeme möglich wird.

Darüber hinaus unterstützt die Methodik neben der Erstellung von Änderungsstrukturmodellen die Analyse und konkrete Nutzung der identifizierten Zusammenhänge im Änderungsmanagement, insbesondere zur Realisierung der Vorverlagerung und Vermeidung von Änderungen sowie der Effektivität und Effizienz im Änderungsprozess. Des Weiteren bietet die Methodik die Möglichkeit, umfangreiche Änderungszusammenhänge in der Produkt- oder Portfoliostruktur automatisiert zu identifizieren und zu visualisieren. Hierzu werden Änderungsdatenbanken verwendet, die in Unternehmen aufgrund gesetzlicher Anforderungen in der Regel vorliegen, aber bisher nur selten für Analysen genutzt werden. Erste im Rahmen der Evaluation durchgeführte Fallstudien konnten bereits die Anwendbarkeit der Methodik in der industriellen Praxis in der Automobil- und Nutzfahrzeugindustrie demonstrieren. Der Nutzen wurde dabei sowohl für das Änderungsmanagement als auch die Entwicklung durchweg als hoch bis sehr hoch eingeschätzt.

Industriebeitrag

Die mit Hilfe der entwickelten Methodik erhobenen Änderungszusammenhänge erhöhen das Verständnis über Änderungen sowie deren Abhängigkeiten und geben einen umfassenden Überblick über diese in komplexen Produktentwicklungen. In Unternehmen gibt es selten eine einzelne Person, die diese gesamten Zusammenhänge auf einem detaillierten Produktstrukturlevel kennt. Im Gegensatz dazu gibt es aktuell jedoch eine Vielzahl an Besprechungen und Aktivitäten, in denen Informationen über Änderungshäufigkeiten und Vernetzungen benötigt werden (z. B. die FMEA, die Konzeptphase neuer Produkte oder neue Änderungsfälle). Diese Informationen werden häufig nur erfahrungsbasiert eingesteuert, wodurch das Risiko besteht, dass wichtige Zusammenhänge übersehen oder vergessen werden. An diesem Punkt setzt die Methodik an, indem der Umgang mit technischen Änderungen in Unternehmen auf Basis datenbasierter Analysen von Änderungsausbreitungen verbessert wird und die Strategien weniger, frühere, effizientere und effektivere Änderungen unterstützt werden.

Ein großer und nicht zu unterschätzender Beitrag besteht darin, dass diese Forschungsarbeit den Zugang zu weiteren Ansätzen der Forschung ermöglicht, indem Änderungszusammenhänge automatisiert und datenbasiert erhoben werden und der Aufwand zur Modellerstellung reduziert wird.

8.3 Limitationen der Methodik

Die Methodik zur datenbasierten Analyse der Änderungsstruktur ermöglicht einen verbesserten Umgang mit Änderungen. Gleichzeitig unterliegt der Ansatz jedoch bestimmten Limitationen:

Stabilität der Produktstruktur

Die Methodik fokussiert Produktentwicklungen, die über Produktgenerationen hinweg hinsichtlich ihrer Produktstruktur und des zugrundeliegenden Entwicklungsprozesses stabil bleiben. Nur unter dieser Prämisse ist es möglich, Änderungszusammenhänge für neue Entwicklungsprojekte erfolgreich wiederzuverwenden. Sind die Abweichung zwischen verschiedenen

Produktgenerationen hingegen zu groß, sinkt die Aussagekraft der Analysen der Änderungsausbreitung für neue Produktentwicklungen. In diesem Fall ist die Anwendung der Methodik sorgfältig zu überwachen und ggf. durch Experten fortlaufend zu prüfen, inwieweit die Analyseergebnisse trotzdem zutreffend sind.

Datenverfügbarkeit und -qualität

Durch die datenbasierte Erhebung der änderungsbedingten Abhängigkeiten liegt naturgemäß eine starke Abhängigkeit zu verfügbaren Änderungs- und Produktdaten vor. Erfassen Unternehmen ihre technischen Änderungen nicht datenbasiert oder sind benötigte Informationen über die Änderungs- und Produktstruktur nicht verfügbar, ist die Methodik nur bedingt einsetzbar. Der Ansatz erfordert zudem, dass Änderungen nur Änderungsobjekte beinhalten, die auch einen relevanten Zusammenhang für die Änderung aufweisen.

Nicht zuletzt hat die Qualität der Änderungsdaten einen maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Modelle und resultierende Analyseergebnisse. Der Ansatz erfordert daher weitestgehend vollständige, korrekte, aktuelle und widerspruchsfreie Änderungsdaten. Hinsichtlich der Vorhersage von Änderungsausbreitungen können immer nur jene vorhergesagt werden, die in der Vergangenheit bereits aufgetreten sind und dokumentiert wurden.

Benötigte Software

Die Methodik erfordert den Einsatz einer Data Mining Software, um aus den umfangreichen Änderungsdaten automatisiert Strukturen identifizieren zu können. Mit dem Softwareeinsatz gehen unter Umständen Lizenzgebühren sowie der Bedarf nach Mitarbeiterschulungen einher. Für die Visualisierung der Änderungsstruktur und Netzwerkanalysen sind freie Softwaretools auf dem Markt verfügbar. In dieser Arbeit wurde die Open Sources Software Gephi verwendet, für die online zahlreiche Tutorials verfügbar sind.

8.4 Ausblick für weitere Forschungsaktivitäten

Mit der Modellierung von änderungsbedingten Abhängigkeiten in der Produktstruktur sowie deren systematischen Analyse konnte die wesentliche Zielsetzung dieser Arbeit erreicht werden. Für die Weiterentwicklung des Ansatzes bestehen ungeachtet dessen noch zahlreiche Möglichkeiten, nicht zuletzt auf Grund des allgemeinen Digitalisierungs-Trends in der Industrie.

Die entwickelte Methodik fokussiert explizit Daten, die in der Entwicklung typischerweise erfasst und dokumentiert werden. So lässt sich durch den Einsatz bestehender Ressourcen ein effizientes und realisierbares Konzept erzielen. Dennoch werden dadurch nicht alle Potenziale ausgeschöpft, die zu einer Verbesserung von zukünftigen Entwicklungsprojekten genutzt werden können. Ziel weiterer Forschungsaktivitäten sollte folglich die Untersuchung sein, mit welchen zusätzlichen Informationen weitere Analysen und damit Produkt- und Prozessverbesserungen erzielt werden können. Unter Anwendung weiterer Data Mining Verfahren, wie bspw. der Regressionsanalyse, könnten zudem Änderungsdauer und -kosten auf Basis von Änderungsdaten prognostiziert werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die relevanten Einflussfaktoren in den Daten enthalten sind.

Der entwickelte Ansatz adressiert die Produktstruktur und darin enthaltene änderungsbedingte Abhängigkeiten, die zu Änderungsausbreitungen führen. Da dies nur einen Teilausschnitt der

tatsächlichen Änderungsausbreitung darstellt, besteht Forschungsbedarf bezüglich eines umfassenderen Änderungsausbreitungsmodells. Dieses sollte in erster Linie die änderungsbedingten Abhängigkeiten zum Fabrikssystem beinhalten, um der engeren Verzahnung von Produkt und Produktion gerecht zu werden.

Ähnlich verhält es sich mit Abhängigkeiten zum Entwicklungsprozess und zugehörigen Aktivitäten und Rollen. Technische Änderungen können beispielsweise zur Wiederholung von Entwicklungsaktivitäten führen (z. B. Absicherungen, Versuche) oder neue Aktivitäten sowie eine Umplanung erfordern. Zur Ausführung von Entwicklungsaktivitäten sind wiederum Mitarbeiter erforderlich, was direkt die personelle und zeitliche Einsatzplanung eben dieser beeinflussen kann. Solche Abhängigkeiten werden in dem aktuellen Ansatz nicht berücksichtigt und bieten somit weitere Forschungsmöglichkeiten.

Zur Anwendbarkeit der Methodik in einem industriellen Umfeld ist eine durchgängige Rechnerunterstützung erforderlich, die sich in die bestehende IT-Landschaft eines Unternehmens einbetten lässt. In dieser Arbeit wurden dazu lediglich konzeptionelle Überlegungen angestellt. Die Entwicklung einer integrierten und anwenderfreundlichen Lösung, die vom zukünftigen Anwender kein vertieftes Wissen bezüglich der Data Mining Algorithmen erfordert und mit einem selbstlernenden Algorithmus die richtigen Abhängigkeiten identifiziert, bleibt somit eine noch zu lösende Herausforderung.

In Summe steht mit der im Rahmen dieser Dissertation erarbeiteten und in industriellen Fallstudien erprobten Methodik ein Ansatz zur datenbasierter Analyse von Änderungsausbreitungen zur Verfügung, mit dessen Hilfe nicht nur weniger und frühere, sondern auch effizientere und effektivere Änderungen möglich werden – also Änderungen in komplexen technischen Systemen besser gemanagt werden können.

9. Verzeichnisse

9.1 Abkürzungsverzeichnis

AIS	Agrawal, Imielinski und Swami (Entwickler des Algorithmus)
CE	Concurrent Engineering
CPM	Change Prediction Method
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
ECR	Engineering Change Request
ECO	Engineering Change Order
ERP	Enterprise-Resource-Planning
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
ID	Identifikation
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnologie
MDM	Multiple Domain Matrix
PDM	Product Data Management
PE	Produktentwicklung
PLM	Product Lifecycle Management
SE	Simultaneous Engineering
SFB	Sonderforschungsbereich
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
UML	Unified Modeling Language
VDA	Verband der Automobilindustrie

9.2 Literaturverzeichnis

- Agrawal, R., Imielinski, T. & Swami, A. (1993). Mining association rules between sets of items in large databases. *ACM SIGMOD Record*, 22(2), 207–216.
- Ahmad, N., Wynn, D. & Clarkson, J. P. (2009a). Estimating the process cost of implementing engineering change alternatives. *Nordic Conference on Product Lifecycle Management (NordPLM'09)*, Göteborg, Schweden.
- Ahmad, N., Wynn, D. & Clarkson, J. P. (2009b). An MDM-based approach to manage engineering change processes across domains of the design process. *International DSM Conference (DSM'09)*, Greenville, USA.
- Ahmad, N., Wynn, D. & Clarkson, J. P. (2010). Development and evaluation of a tool to estimate the impact of design change. *International Design Conference (DESIGN'2010)*, Dubrovnik, Kroatien.
- Ahmad, N., Wynn, D. & Clarkson, J. P. (2013). Change impact on a product and its redesign process: A tool for knowledge capture and reuse. *Research in Engineering Design*, 24(3), 219–244.
- Ahmadinejad, S. A. & Afshar, A. (2014). Management of change propagation in mechatronic product design based on minimum cost of changes. *International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM'14)*, Tehran, Iran.
- Ahmed-Kristensen, S. & Kanike, Y. (2007). Engineering change during a product's lifecycle. *International Conference on Engineering Design (ICED'07)*, Paris, Frankreich.
- Ahmed-Kristensen, S., Wynn, D. & Clarkson, J. P. (2011). Information models used to manage engineering change: A review of literature 2005-2010. *International Conference on Engineering Design (ICED'11)*, Kopenhagen, Dänemark.
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015). Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP'15)*, Stuttgart.
- Ariyo, O. O., Keller, R., Eckert, C. M. & Clarkson, J. P. (2007). Predicting change propagation on different levels of granularity: An algorithmic view. *International Conference on Engineering Design (ICED'07)*, Paris, Frankreich.
- Aßmann, G. (1998). Aktionsfeld 1: Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen. U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (S. 107–131). Berlin: Springer.
- Aßmann, G. (2000). *Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung*. Dissertation. Technische Universität München.
- Aßmann, G. & Conrat Niemerg, J. I. (1998). Modell eines Integrierten Änderungsmanagements. U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (S. 47–59). Berlin: Springer.

- Aßmann, G., Papke, M. & Riedel, D. (1998). Erste Erfolge einer Umsetzung in der Praxis. U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (S. 266–275). Berlin: Springer.
- Bashir, H. A. & Thomson, V. (1999). Estimating design complexity. *Journal of Engineering Design*, 10(3), 247–257.
- Bauer, W., Chucholowski, N., Lindemann, U. & Maurer, M. S. (2015). Domain-spanning change propagation in changing technical systems. M.-A. Cardin, D. Krob, P. C. Lui, Y. H. Tan, & K. L. Wood (Hrsg.), *Complex Systems Design & Management Asia* (S. 111–123). Heidelberg: Springer.
- Bea, F. X. & Göbel, E. (2010). *Organisation: Theorie und Gestaltung*. Stuttgart: UTB.
- Belener, P. M. (2008). *Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse*. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum.
- Belt, A., Hagel, K. von & Ferguson, S. (2015). Navigating redesign and market desirability implications when considering increased product variety. *Journal of Engineering Design*, 26(7-9), 236–258.
- Biedermann, W. (2014). *A minimal set of network metrics for analysing mechatronic product concepts*. Dissertation. Technische Universität München.
- Bischof, A. & Blessing, L. T. M. (2008). Guidelines for the development of flexible products. *International Design Conference (DESIGN'08)*, Dubrovnik, Kroatien.
- Blessing, L. T. M. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a design research methodology*. London: Springer.
- Braha, D. (2013). *Data mining for design and manufacturing: methods and applications*. New York: Springer.
- Brown, J. & Boucher, M. (2007). *Engineering change management 2.0: Better business decisions from intelligent change management*. Aberdeen Group: A Harte-Hanks Company.
- Browning, T. R. (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 48(3), 292–306.
- Browning, T. R. (2002). Process integration using the design structure matrix. *Systems Engineering*, 5(3), 180–193.
- Browning, T. R. (2016). Design structure matrix extensions and innovations: A survey and new opportunities. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 63(1), 27–52.
- Burghardt, M. (2013). *Einführung in Projektmanagement: Definition, Planung, Kontrolle und Abschluss*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Chang, A. S.-T. (2002). Reasons for cost and schedule increase for engineering design projects. *Journal of Management in Engineering*, 18(1), 29–36.
- Chang, A. S.-T., Shih, J. S. & Choo, Y. S. (2011). Reasons and costs for design change during production. *Journal of Engineering Design*, 22(4), 275–289.

- Chapman, P., Clinton, J., Kerber, R., Khabaza, T., Reinartz, T., Shearer, C. & Wirth, R. (2000). *CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide*.
- Chen, C.-Y., Liao, G.-Y. & Lin, K.-S. (2015). An attribute-based and object-oriented approach with system implementation for change impact analysis in variant product design. *Computer-Aided Design*, 62(C), 203–217.
- Cheng, H. & Chu, X. (2012). A network-based assessment approach for change impacts on complex products. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(4), 1419–1431.
- Chua, D. K. H. & Hossain, M. A. (2012). Predicting change propagation and impact on design schedule due to external changes. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 59(3), 483–493.
- Clark, K. B. & Fujimoto, T. (1991). *Product development performance: Strategy, organization, and management in the world auto industry*. Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press.
- Clarkson, J. P., Simons, C. & Eckert, C. M. (2001). Change prediction for product redesign. *International Conference on Engineering Design (ICED'01)*, Glasgow, UK.
- Clarkson, J. P., Simons, C. & Eckert, C. M. (2004). Predicting change propagation in complex design. *Journal of Mechanical Design*, 126(5), 788–797.
- Cohen, T., Navathe, S. B. & Fulton, R. E. (2000). C-FAR, change favorable representation. *Computer-Aided Design*, 32(5), 321–338.
- Conrad, J., Deubel T., Köhler, C. M., Wanke, S. & Weber, C. (2007). Change Impact and Risk Analysis (CIRA): Combining the CPM/PDD theory and FMEA-methodology for an improved engineering change management. *International Conference on Engineering Design (ICED'07)*, Paris, Frankreich.
- Conrat Niernerg, J. I. & Voigt, P. (1998). Defizite im heutigen Änderungsmanagement. U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (S. 25–34). Berlin: Springer.
- Conrat Niernerg, J. I. (1997). *Änderungskosten in der Produktentwicklung*. Dissertation. Technische Universität München.
- Costa, L. d. F., Rodrigues, F. A., Travieso, G. & Villas Boas, P. R. (2007). Characterization of complex networks: A survey of measurements. *Advances in Physics*, 56(1), 167–242.
- Da Cunha, C., Agard, B. & Kusiak, A. (2006). Data mining for improvement of product quality. *International journal of production research*, 44(18-19), 4027–4041.
- Dale, B. G. (1982). The management of engineering change procedure. *Engineering Management International*, 1(3), 201–208.
- Danilovic, M. & Browning, T. R. (2007). Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. *International journal of project management*, 25(3), 300–314.

- Deubzer, F., Kreimeyer, M. & Lindemann, U. (2006). Exploring strategies in change management—current status and activity benchmark. *International Design Conference (DESIGN'06)*, Dubrovnik, Kroatien.
- Deubzer, F., Kreimeyer, M., Rock, B. & Junior, T. (2005). Der Änderungsmanagement Report 2005. *CiDaD Working Paper Series, Jahrgang 01*(Nr. 01).
- DIN 199-4:1981. *Begriffe im Zeichnungs- und Stücklistenwesen – Änderungen*.
- DIN 6789-3:2011. *Dokumentationssystematik – Änderungen von Dokumenten und Gegenständen, Allgemeine Anforderungen*.
- DIN EN ISO 9000:2015. *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*.
- DIN EN ISO 9001:2015. *Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*.
- Do, N., Choi, I. J. & Jang, M. K. (2002). A structure-oriented product data representation of engineering changes for supporting integrity constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20(8), 564–570.
- Duden (2016a). Artikel "a posteriori": Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Synonyme, Herkunft. <http://www.duden.de/node/817602/revisions/1606457/view>
- Duden (2016b). Artikel "a priori": Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Synonyme, Herkunft. <http://www.duden.de/node/817692/revisions/1610545/view>
- Eckert, C. M., Clarkson, J. P., Weck, O. de, Keller, R. & others (2009). Engineering change: drivers, sources, and approaches in industry. *International Conference on Engineering Design (ICED'09)*, Palo Alto, USA.
- Eckert, C. M., Clarkson, J. P. & Zanker, W. (2004). Change and customisation in complex engineering domains. *Research in Engineering Design*, 15(1), 1–21.
- Eder, J. & Groiss, H. (1996). Ein Workflow-Managementsystem auf der Basis aktiver Datenbanken. J. Becker & G. Vossen (Hrsg.), *Geschäftsprozeßmodellierung und Workflow-Management* (S. 1–17). Bonn: Albany.
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2013). *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (5. Auflage). München: Carl Hanser Verlag.
- Eigner, M. & Stelzer, R. (2009). *Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. Berlin: Springer.
- Eisenhardt, K. M. (1989). Building theories from case study research. *Academy of management review*, 14(4), 532–550.
- Elezi, F., Sharafi, A., Mirson, A., Wolf, P., Krcmar, H. & Lindemann, U. (2011). A knowledge discovery in databases (KDD) approach for extracting causes of iterations in engineering change orders. *International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE'11)*, Washington, D.C, USA.
- Eppinger, S. D. & Browning, T. R. (2012). *Design structure matrix methods and applications*. Boston, Massachusetts: MIT press.

- Eppler, M. J. & Mengis, J. (2008). The concept of information overload - A review of literature from organization science, accounting marketing, MIS, and related disciplines. M. Meckel (Hrsg.), *Kommunikationsmanagement im Wandel* (1st ed., S. 270–305). Wiesbaden: Gabler.
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G. & Smyth, P. (1996a). From data mining to knowledge discovery in databases. *AI magazine*, 17(3), 37.
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G. & Smyth, P. (1996b). The KDD process for extracting useful knowledge from volumes of data. *Communications of the ACM*, 39(11), 27–34.
- Fei, G., Gao, J., Owodunni, O. & Tang, X. (2011). A method for engineering design change analysis using system modelling and knowledge management techniques. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(6), 535–551.
- Feldhusen, J., Grote, K.-H., Göpfert, J. & Tretow, G. (2012a). Technische Systeme. J. Feldhusen & K.-H. Grote (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (S. 237–279). Berlin: Springer.
- Feldhusen, J., Grote, K.-H., Kochan, D., Beyer, C., Vajna, S., Lashin, G., . . . Erk, P. (2012b). Die PEP-begleitenden Prozesse. J. Feldhusen & K.-H. Grote (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (S. 25–236). Berlin: Springer.
- Feldhusen, J., Grote, K.-H., Nagarajah, A., Pahl, G., Beitz, W. & Wartzack, S. (2012c). Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. J. Feldhusen & K.-H. Grote (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (S. 319–341). Berlin: Springer.
- Flanagan, T. L., Eckert, C. M., Smith, J., Eger, T. & Clarkson, J. P. (2003). A functional analysis of change propagation. *International Conference on Engineering Design (ICED'03)*, Stockholm, Schweden.
- Franke, N. & Schrader, S. (1998). *Innovationsforschung und Technologiemanagement: Konzepte, Strategien, Fallbeispiele*. Berlin: Springer.
- Frawley, W. J., Piatetsky-Shapiro, G. & Matheus, C. J. (1992). Knowledge discovery in databases: An overview. *AI magazine*, 13(3), 57.
- Freeman, L. C. (1979). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social networks*, 1(3), 215–239.
- Fricke, E. (1998). *Der Änderungsprozeß als Grundlage einer nutzerzentrierten Systementwicklung*. Dissertation. Technische Universität München.
- Fricke, E., Gebhard, B., Negele, H. & Igenbergs, E. (2000). Coping with changes: causes, findings, and strategies. *Systems Engineering*, 3(4), 169–179.
- Fricke, E. & Schulz, A. P. (2005). Design for Changeability (DfC): Principles to enable changes in systems throughout their entire lifecycle. *Systems Engineering*, 8(4), 342–359.

- Garfinkel, I., Glei, D. & McLanahan, S. S. (2002). Assortative mating among unmarried parents: Implications for ability to pay child support. *Journal of Population Economics*, 15(3), 417–432.
- Gausemeier, J. (2001). *Produktinnovation: Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen*. München: Hanser.
- Gausemeier, J., Hahn, A., Kespohl, H. D. & Seifert, L. (2006). *Vernetzte Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Gemmerich, M. (1995). *Technische Produktänderungen - betriebswirtschaftliche und empirische Modellanalyse*. Dissertation.
- Giffin, M. L., de Weck, O., Bounova, G., Keller, R., Eckert, C. M. & Clarkson, J. P. (2009). Change propagation analysis in complex technical systems. *Journal of Mechanical Design*, 131, 081001-1.
- Gille, C. (2013). *Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte*. Dissertation. Universität Stuttgart.
- Gross, J. L. & Yellen, J. (2004). *Handbook of graph theory*. New York: CRC press.
- Guare, J. (1990). *Six degrees of separation: A play*. New York: Vintage.
- Haberfellner, R. (2012). *Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung*. Zürich: Orell Füssli.
- Hamraz, B. (2013). *Engineering change modelling using a function-behaviour-structure scheme*. Dissertation. University of Cambridge.
- Hamraz, B., Caldwell, Nicholas H. M. & Clarkson, J. P. (2013a). A holistic categorization framework for literature on engineering change management. *Systems Engineering*, 16(4), 473–505.
- Hamraz, B., Caldwell, Nicholas H. M. & Wynn, D. (2013b). Requirements-based development of an improved engineering change management method. *Journal of Engineering Design*, 24(11), 765–793.
- Hamraz, B., Hisarciklilar, O., Rahmani, K., Wynn, D., Thomson, V. & Clakson, J. P. (2013c). Change prediction using interface data. *Concurrent Engineering: Research and Applications*, 2013(21), 141–154.
- Harding, J. A., Shahbaz, M. & Kusiak, A. (2006). Data mining in manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128(4), 969–976.
- Hesse, M., Weber, C. & Diestelkamp, H. (2011). Bewertung von Methoden zur Herstellbarkeitsabsicherung von Serienfahrzeugen. *Symposium "Design for X"*, Tutzing.
- Hevner, A. & Chatterjee, S. (2010). *Design science research in information systems*.
- Hiller, F. (1997). *Ein Konzept zur Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung*. Dissertation. Universität Kaiserslautern.
- Horváth, P. (2011). *Controlling* (12. Auflage). *Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften*. München: Vahlen, Franz.

- Huang, G. Q., Lo, V. H., Yee, W. Y. & Mak, K. L. (2000). A methodology for engineering change impact analysis. *International Conference on Computer Aided Production Engineering (CAPE'2000)*, Edinburgh, UK.
- Huang, G. Q. & Mak, K. L. (1999). Current practices of engineering change management in UK manufacturing industries. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(1), 21–37.
- Huang, G. Q., Yee, W. Y. & Mak, K. L. (2003). Current practice of engineering change management in Hong Kong manufacturing industries. *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1-3), 481–487.
- Illik, J. A. (2009). *Formale Methoden der Informatik: Von der Automatentheorie zu Algorithmen und Datenstrukturen*. Renningen: Expert-Verl.
- ISO 10303-11:2004. *Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdatendarstellung und -austausch - Teil 11: Beschreibungsmethoden: Handbuch der Modellierungssprache EXPRESS*.
- ISO 10303-21:2016. *Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdatendarstellung und -austausch*.
- Jain, S. & Kabra, S. (2012). Mining & optimization of association rules using effective algorithms. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(4), 281–285.
- Jania, T. (2004). *Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung*. Dissertation. Universität Paderborn.
- Jarratt, T. A. W. (2004). *A model-based approach to support the management of engineering change*. Dissertation. University of Cambridge.
- Jarratt, T. A. W. & Clarkson, J. P. (2005). Engineering change. J. P. Clarkson & C. M. Eckert (Hrsg.), *Design process improvement* (S. 262–285). London: Springer.
- Jarratt, T. A. W., Eckert, C. M., Caldwell, Nicholas H. M. & Clarkson, J. P. (2011). Engineering change: an overview and perspective on the literature. *Research in Engineering Design*, 22(2), 103–124.
- Jarratt, T. A. W., Eckert, C. M. & Clarkson, J. P. (2004). Development of a product model to support engineering change management. *Proceedings of the TCME*, 12–16.
- Keese, D. A., Takawale, N. P., Seepersad, C. C. & Wood, K. L. (2006). An enhanced change modes and effects analysis (CMEA) tool for measuring product flexibility with applications to consumer products. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'06)*, Philadelphia, USA.
- Kim, S. Y., Moon, S. K., Oh, H. S., Park, T., Kyung, G. & Park, K. J. (2013). Change propagation analysis for sustainability in product design. *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Bangkok, Thailand.

- Kleedörfer, R. W. (1998). *Prozess- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung*. Dissertation. Technische Universität München.
- Kocar, V. & Akgunduz, A. (2010). ADVICE: A virtual environment for Engineering Change Management. *Computers in Industry*, 61(1), 15–28.
- Koh, E. C. Y., Caldwell, Nicholas H. M. & Clarkson, J. P. (2009). Using a matrix-based approach to model change propagation. *International DSM Conference (DSM'09)*, Greenville, USA.
- Koh, E. C. Y., Caldwell, Nicholas H. M. & Clarkson, J. P. (2012). A method to assess the effects of engineering change propagation. *Research in Engineering Design*, 23(4), 329–351. doi:10.1007/s00163-012-0131-3
- Köhler, C. M. (2009). *Technische Produktänderungen. Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterung des CPM/PDD-Ansatzes*. Dissertation. Universität des Saarlandes.
- Kossiakoff, A., Sweet, W. N., Seymour, S. J. & Biemer, S. M. (2011). *Systems engineering principles and practice* (2. Auflage). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Kramer, F. & Kramer, M. (1997). *Bausteine der Unternehmensführung: Kundenzufriedenheit und Unternehmenserfolg* (2. Auflage). *Innovations- und Technologiemanagement*. Berlin: Springer.
- Kreimeyer, M. (2010). *A structural measurement system for engineering design processes*. Dissertation. Technische Universität München.
- Kreimeyer, M. & Lindemann, U. (2011). *Complexity metrics in engineering design: Managing the structure of design processes*. New York: Springer.
- Kreuseler, M. & Schumann, H. (2002). A flexible approach for visual data mining. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 8(1), 39–51.
- Kurgan, L. A. & Musilek, P. (2006). A survey of knowledge discovery and data mining process models. *The Knowledge Engineering Review*, 21(01), 1–24.
- Kusiak, A. (2000). Decomposition in data mining: An industrial case study. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 23(4), 345–353.
- Kusiak, A. & Smith, M. (2007). Data mining in design of products and production systems. *Annual Reviews in Control*, 31(1), 147–156.
- Langer, S., Wilberg, J., Maier, A. & Lindemann, U. (2012). Änderungsmanagement-Report 2012, *Jahrgang 08*(Nr. 1).
- Langlotz, M. (2011). *Konzept zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen in der Produktentwicklung durch Product Lifecycle Management am Beispiel des Änderungswesens*. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern.
- Lauer, W. (2010). *Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in dynamischen Produktentwicklungsprozessen*. Dissertation. Technische Universität München.

- Lee, H., Seol, H., Sung, N., Hong, Y. S. & Park, Y. (2010). An analytic network process approach to measuring design change impacts in modular products. *Journal of Engineering Design*, 21(1), 75–91.
- Lee, H. J., Ahn, H. J., Kim, J. W. & Park, S. J. (2006). Capturing and reusing knowledge in engineering change management: A case of automobile development. *Information Systems Frontiers*, 8(5), 375–394.
- Lee, T. (2003). *Complexity theory in axiomatic design*. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology.
- Li, J., Zhang, D. & Li, S. (2008). Engineering change management based on weighted complex networks. *Future Information Technology and Management Engineering (FITME'08)*, Leicestershire, UK.
- Li, S. & Chen, L. (2014). Identification of Clusters and Interfaces for Supporting the Implementation of Change Requests. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 61(2), 323–335.
- Li, W. & Moon, Y. B. (2012). Modeling and managing engineering changes in a complex product development process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(9-12), 863–874.
- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden* (3. Auflage). Berlin: Springer-Verlag.
- Lindemann, U., Maurer, M. S. & Braun, T. (2009). *Structural complexity management: An approach for the field of product design*. Berlin: Springer.
- Lindemann, U., Maurer, M. S. & Kreimeyer, M. (2005). Intelligent strategies for structuring products. *Engineering Design. Theory and practice*, Cambridge, UK.
- Lindemann, U. & Reichwald, R. (Hrsg.) (1998). *Integriertes Änderungsmanagement*. Berlin: Springer.
- Lint, O. & Pennings, E. (1999). Finance and strategy: Time-to-wait or time-to-market? *Long range planning*, 32(5), 483–493.
- Ma, S., Song, B., Lu, W. F. & Zhu, C. F. (2003). A knowledge-supported system for engineering change impact analysis. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (DETC'03)*, Chicago, USA.
- Ma, Y., Chen, G. & Thimm, G. (2008). Change propagation algorithm in a unified feature modeling scheme. *Computers in Industry*, 59(2), 110–118.
- Maier, A. & Langer, S. (2011). *Engineering change management report 2011: Survey results on causes and effects, current practice, problems, and strategies in Denmark* (No. 17). Technical University of Denmark, DTU.
- Maier, J. F., Eckert, C. M. & Clarkson, J. P. (2015). Different levels of product model granularity in design process simulation. *International Conference on Engineering Design (ICED'15)*, Mailand, Italien.

- Maier, J. F., Wynn, D., Biedermann, W., Lindemann, U. & Clarkson, J. P. (2014). Simulating progressive iteration, rework and change propagation to prioritise design tasks. *Research in Engineering Design*, 25(4), 283–307.
- Martin, M. V. & Ishii, K. (2002). Design for variety: developing standardized and modularized product platform architectures. *Research in Engineering Design*, 13(4), 213–235.
- Mauil, R., Hughes, D. & Bennett, J. (1992). The role of the bill-of-materials as a CAD/CAPM interface and the key importance of engineering change control. *Computing & Control Engineering Journal*, 3(2), 63–70.
- Maurer, M. S. (2007). *Structural awareness in complex product design*. Dissertation. Technische Universität München.
- Milo, R., Shen-Orr, S., Itzkovitz, S., Kashtan, N., Chklovskii, D. & Alon, U. (2002). Network motifs: simple building blocks of complex networks. *Science*, 298(5594), 824–827.
- Morkos, B., Shankar, P. & Summers, J. D. (2012). Predicting requirement change propagation, using higher order design structure matrices: an industry case study. *Journal of Engineering Design*, 23(12), 905–926.
- Morkos, B. & Summers, J. D. (2010). Requirement change propagation prediction approach: results from an industry case study. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2010)*, Montreal, Kanada.
- Müller, R. M. & Lenz, H.-J. (2013). *Business Intelligence*. Berlin: Springer Vieweg.
- Nedeß, C., Friedewald, A. & Davids, N. (2006). Prozessunterstützung in Produktentwicklungsprojekten. *Symposium "Design for X"*, Neukirch.
- Newman, M. E. J. (2003a). Mixing patterns in networks. *Physical Review E*, 67(2), 026126.
- Newman, M. E. J. (2003b). The structure and function of complex networks. *SIAM review*, 45(2), 167–256.
- Nisbet, R., Elder, J. F. & Miner, G. (2009). *Handbook of statistical analysis and data mining applications*. Amsterdam: Academic Press.
- Ollinger, G. A. & Stahovich, T. F. (2001). RedesignIT: A constraint-based tool for managing design changes. *Proceedings of DETC '01 ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*,
- Ollinger, G. A. & Stahovich, T. F. (2004). RedesignIT: A model-based tool for managing design changes. *Journal of Mechanical Design*, 126(2), 208–216.
- Orton, J. D. & Weick, K. E. (1990). Loosely coupled systems: A reconceptualization. *Academy of management review*, 15(2), 203–223.
- Ouertani, M. Z. (2008). Supporting conflict management in collaborative design: An approach to assess engineering change impacts. *Computers in Industry*, 59(9), 882–893.

- Ouertani, M. Z., Yesilbas, L. G. & Lossent, L. (2004). Engineering change process: State of the art, a case study and proposition of an impact analysis method. *International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME'04)*, Bath, UK.
- Pahl, B. & Beitz, W. (Hrsg.) (1993). *Konstruktionslehre* (3. Auflage). Berlin: Springer-Verlag.
- Pasqual, M. C. & de Weck, O. (2012). Multilayer network model for analysis and management of change propagation. *Research in Engineering Design*, 23(4), 305–328.
- Patzak, G. (1982). *Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin: Springer.
- Petersohn, H. (2005). *Data Mining: Verfahren, Prozesse, Anwendungsarchitektur*. München: Oldenbourg.
- Pflicht, W. (1989). *Technisches Änderungswesen in Produktionsunternehmen: Ablauforganisation - PPS - Grunddatenverwaltung - Schwachstellenanalyse - Kostenminimierung*. Berlin: VDE.
- Powers, D. M. (2011). Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*, 2(1), 37–63.
- Raffaelli, R., Germani, M., Graziosi, S. & Mandorli, F. (2007). Development of a multilayer change propagation tool for modular products. *International Conference on Engineering Design (ICED'07)*, Paris, Frankreich.
- Reddi, K. R. & Moon, Y. B. (2009). A framework for managing engineering change propagation. *International Journal of Innovation and Learning*, 6(5), 461–476.
- Reichwald, R. & Conrat Niemerg, J. I. (1996). Engineering Change Data Management: Ein Ansatz zur Prozeßoptimierung in der Produktentwicklung. *Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 91(9), 398–400.
- Reinhart, G., Lindemann, U. & Heinzl, J. (1996). *Qualitätsmanagement: Ein Kurs für Studium und Praxis*. Berlin: Springer.
- Rickayzen, A., Dart, J., Brennecke, C. & Schneider, M. (2002). *Workflow-Management mit SAP: Effektive Geschäftsprozesse mit SAPs WebFlow Engine*. Bonn: Galileo Press.
- Riedel, D. (1998). Aktionsfeld 6: Gesamtheitliche wirtschaftliche Bewertung und Entscheidung. U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (S. 204–215). Berlin: Springer.
- Riedel, D. & Voigt, P. (1998). Bausteine für eine Optimierung des Änderungsmanagements. U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (S. 61–106). Berlin: Springer.
- Riviere, A., Da Cunha, C. & Tollenaere, M. (2013). Performances in engineering changes management. *International Conference on Engineering Design (ICED'13)*, Seoul, Korea.

- Riviere, A., F eru, F. & Tollenaere, M. (2003). Controlling product related engineering changes in the aircraft industry. *International Conference on Engineering Design (ICED'03)*, Stockholm, Schweden.
- Ross, A. M., Rhodes, D. H. & Hastings, D. E. (2008). Defining changeability: Reconciling flexibility, adaptability, scalability, modifiability, and robustness for maintaining system lifecycle value. *Systems Engineering*, 11(3), 246–262.
- Rouibah, K. & Caskey, K. R. (2003). Change management in concurrent engineering from a parameter perspective. *Computers in Industry*, 50(1), 15–34.
- Rowell, W., Duffy, A. H. B., Boyle, I. M., Masson, N. & Babcock Marine, R. (2009). The nature of engineering change in a complex product development cycle. *Conference on Systems Engineering Research (CSER'09)*, Loughborough, UK.
- Runkler, T. A. (2010). *Data-Mining: Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse* (1st ed.). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Rutka, A., Guenov, M. D., Lemmens, Y., Schmidt-Schäffer, T., Coleman, P. & Riviere, A. (2006). Methods for engineering change propagation analysis. *International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS'06)*, Hamburg.
- Saynisch, M. (1984). *Konfigurationsmanagement: Fachlich-inhaltliche Entwurfssteuerung, Dokumentation und  nderungswesen im ganzheitlichen Projektmanagement*. Köln: T UV Rheinland.
- Schuh, G. (2014). *Produktkomplexit at managen: Strategien - Methoden - Tools*. München: Carl Hanser.
- Shankar, P., Summers, J. & Phelan, K. (2014). A verification and validation planning method to adress change propagation effects in engineering design. *International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE'14)*, Budapest, Ungarn.
- Sharafi, A. (2013). *Knowledge Discovery in Databases. Eine Analyse des  nderungsmanagements in der Produktentwicklung*. Dissertation. Technische Universität München.
- Siddiqi, A., Bounova, G., de Weck, O., Keller, R. & Robinson, B. (2011). A posteriori design change analysis for complex engineering projects. *Journal of Mechanical Design*, 133(10), 101005.
- Smith, P. G. & Reinertsen, D. G. (1991). *Developing products in half the time*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Spur, G. & Krause, F.-L. (1997). *Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik*. München Wien: Carl Hanser Verlag.
- Stegbauer, C. (2010). *Netzwerkanalyse und Netzwerktheorie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Steward, D. V. (1981). The design structure system: A method for managing the design of complex systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, (3), 71–74.
- Sudin, M. N. & Ahmed, S. (2009). Investigation of change in specifications during a product's lifecycle. *International Conference on Engineering Design (ICED'09)*, Palo Alto, USA.

- Summers, J. D. & Shah, J. J. (2003). Developing measures of complexity for engineering design, *Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (DETC'03)*.
- Terwiesch, C. & Loch, C. H. (1999). Managing the process of engineering change orders: The case of the climate control system in automobile development. *Journal of Product Innovation Management*, 16(2), 160–172.
- Turau, V. & Weyer, C. (2015). *Algorithmische Graphentheorie* (4., Auflage). De Gruyter Studium. Berlin: De Gruyter.
- Ullman, D. G. (2003). *The mechanical design process* (3. Auflage). New York: McGraw-Hill.
- Ulrich, K. (1995). The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research policy*, 24(3), 419–440.
- Vajna, S., Weber, C., Bley, H. & Zeman, K. (2009). *CAX für Ingenieure: eine praxisbezogene Einführung*. Berlin: Springer-Verlag.
- VDA 4965:2010. *Engineering Change Management Reference Process*.
- VDA 4965-0:2010. *ECM recommendation*.
- Vianello, G. & Ahmed, S. (2008). Engineering changes during the service phase. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2008)*, Brooklyn, USA.
- Voigt, P. & Conrat Niemerg, J. I. (1998). Aktionsfeld 8: Lernorientierte Auswertung von Änderungsdaten. U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (S. 237–256). Berlin: Springer.
- Voigt, P. & Riedel, D. (1998). Aktionsfeld 7: Effiziente Abwicklung von Änderungen. U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (S. 216–236). Berlin: Springer.
- Wasmer, A., Staub, G. & Vroom, R. W. (2011). An industry approach to shared, cross-organizational engineering change handling-processing: The road towards standards for product data. *Computer-Aided Design*, 43(5), 533–545.
- Watts, D. J. & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *nature*, 393(6684), 440–442.
- Weber, C. (2005a). CPM/PDD – An extended theoretical approach to modelling products and product development processes, *2nd German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes*.
- Weber, C. (2005b). What is "complexity"? *International Conference on Engineering Design (ICED'05)*, Melbourne, Australia.
- Webster, J. & Watson, R. T. (2002). Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. *Management Information Systems Quarterly*, 26(2), 13–23.

- Wickel, M., Behncke, F. G. H. & Lindemann, U. (2013a). When to check for deviations in the design process - an approach to determine a systematic checkpoint schedule. *International Conference on Engineering Design (ICED'13)*, Seoul, Korea.
- Wickel, M., Chucholowski, N., Behncke, F. & Lindemann, U. (2014a). Comparison of seven company-specific engineering change processes. *Modelling and Management of Engineering Processes*, Gommern.
- Wickel, M., Langer, S., Chucholowski, N. & Lindemann, U. (2014). A categorization and visualization scheme to determine Engineering Change Effects in companies. *International Conference on Advanced Design Research and Education (ICADRE'2014)*, Singapur.
- Wickel, M. & Lindemann, U. (2014a). A retrospective analysis of engineering change orders to identify potential for future improvements. *NordDesign 2014*, Helsinki, Finnland.
- Wickel, M. & Lindemann, U. (2015). How to build up an engineering change dependency model based on past change data?, *Risk and change management in complex systems. Proceedings of the 17th International DSM Conference* (S. 221–231). München: Carl Hanser.
- Wickel, M. & Lindemann, U. (2015b). How to integrate information about past Engineering Changes in new change processes? *International Conference on Engineering Design (ICED'15)*, Mailand, Italien.
- Wickel, M., Schenkl, S. A., Schmidt, D. M., Hense, J., Mandl, H. & Maurer, M. S. (2013b). Knowledge structure maps based on Multiple Domain Matrices. *The Journal of Innovation Impact*, 5(1), 5–16.
- Wildemann, H. (1998). *Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung* (5. Auflage). München: TCW-Transfer-Centrum.
- Wilds, J. M. (2008). *A methodology for identifying flexible design opportunities*. Bachelorthesis. Massachusetts Institute of Technology.
- Wright, I. C. (1997). A review of research into engineering change management: Implications for product design. *Design Studies*, 18(1), 33–42.
- Wynn, D., Caldwell, Nicholas H. M. & Clarkson, J. P. (2014). Predicting change propagation in complex design workflows. *Journal of Mechanical Design*, 136(8), 081009.
- Yang, F. & Duan, G.-j. (2012). Developing a parameter linkage-based method for searching change propagation paths. *Research in Engineering Design*, 23(4), 353–372.
- Yang, M. C., Wood III, William H. & Cutkosky, M. R. (2005). Design information retrieval: A thesauri-based approach for reuse of informal design information. *Engineering with Computers*, 21(2), 177–192.

9.3 Studienarbeitsverzeichnis

Im Rahmen des Dissertationsprojekts sind neun relevante Studienarbeiten entstanden, die von der Autorin inhaltlich und forschungsmethodisch intensiv betreut wurden. In regelmäßigen Abstimmungstreffen wurden der Fortschritt der Studienarbeiten diskutiert und die Studierenden hinsichtlich der inhaltlichen Ausrichtung angeleitet. Ausgewählte Teile der nachfolgend alphabetisch aufgelisteten Studienarbeiten haben zu dieser Dissertation beigetragen.

Name	Themenstellung	Art der Arbeit	Jahr	Relevantes Kapitel
Büchler, M.	Entwicklung eines „Recommendation Systems“ zur Unterstützung des Änderungsmanagements	IDP	2015	6.4.2
Nusser, F.	Ein Vorgehen zur Bewertung der Auswirkungen technischer Änderungen	BA	2015	5.1, 5.2
Selle, D.	Machine Learning und Data Mining Analysen für das technische Änderungsmanagement	SA	2015	3.2
Lucas, L.	Ermittlung der Prozesskonformität eines neuen technischen Änderungsprozesses	BA	2015	2.3
Echle, S.	Systematische Analyse vergangener Änderungsdaten zur Effizienzsteigerung von Änderungsprozessen	BA	2014	3.2
Meng, C.	Systematische Analyse von großen Datenmengen mit dem Ziel der Wissensgenerierung im Änderungsmanagement	BA	2014	3.2
Hollauer, C.	Konzept eines lernorientierten Änderungsmanagements	DA	2013	2.1.3, 2.2.1
Öttl, T.	Entwicklung eines Kategorisierungsrahmens für Analysemethoden zur Eigenschaftsermittlung in Entwicklungsprozessen	BA	2013	2.1.3
Rupieper, A.	Vorgehensmodell zur Effizienzsteigerung im Entwicklungsprozess durch Vorverlagerung fehlerbedingter Änderungen	BA	2013	6.3.2

DA: Diplomarbeit, BA: Bachelorarbeit, SA: Semesterarbeit, IDP: Interdisziplinäres Projekt

10. Anhang

10.1 Ergänzungen zur Einführung

Tabelle 10-1: Treffen des Arbeitskreises Änderungsmanagements unter Teilnahme der Autorin (2012 – 2015)

Nr.	Datum	Themenstellung	Workshop	Teilnehmende
1.	24.08.2012	Risiken und Auswirkungen von Änderungen	Herausforderungen, Best Practice und Lösungsansätze der Unternehmen	11 Industrievertreter 4 Wissenschaftler
2.	03.12.2012	Ursachenanalyse von Änderungen	Best Practice und Herausforderungen in der Ursachenanalyse	6 Industrievertreter 4 Wissenschaftler
3.	24.04.2013	Änderungsprozesse aus Literatur, Normen und von Unternehmen	Vergleich von unternehmensspezifischen Änderungsprozessen	9 Industrievertreter 3 Wissenschaftler
4.	19.07.2013	Situationsbeschreibung von Zielabweichungen	Kriterien zur Situationsbeschreibung von Änderungen in der Industrie	6 Industrievertreter 3 Wissenschaftler
5.	29.11.2013	Tools im Änderungsmanagement	Vorstellung und Diskussion der Tools der Teilnehmer	8 Industrievertreter 3 Wissenschaftler
6.	21.11.2014	Entscheidungssituationen und -prozesse	Fehlentscheidungen – Ursachen und Gegenmaßnahmen	10 Industrievertreter 6 Wissenschaftler
7.	18.09.2015	Änderungen in der Produktion	Herausforderungen und Stellhebel im Änderungsmanagement für die Produktion	5 Industrievertreter 4 Wissenschaftler

10.2 Ergänzungen zum Stand der Forschung und Technik

Literaturstudie: A priori Analyse von Änderungsausbreitungen

Die Tabelle 10-2 stellt die Ergebnisse einer systematischen und umfangreichen Literaturrecherche auf dem Gebiet der a priori Analyse von Änderungsausbreitungen dar. Für die Recherche wurden die Literaturdatenbanken ScienceDirect, SCOPUS, Web of Science und Google Scholar verwendet.

Die Methoden sind in der Tabelle entsprechend ihrer Art der Erhebung und Modellierung klassifiziert. Hierbei wurden interviewbasierte (I), datenbasierte (B) und andere Methoden (-) hinsichtlich der Erhebung unterschieden. Bezüglich der Modellierung wurden matrixbasierte (M), datenbankbasierte (DB), netzwerk- oder graphbasierte (N) oder andere (a) Modellierungen differenziert.

Tabelle 10-2: Literaturstudie zu Methoden zur a priori Analyse von Änderungsausbreitungen

	Quellen	Kurzbeschreibung	Erhebung			Modellierung			
			I	D	-	M	DB	N	a
1	Ahmad et al. (2009b) **	MDM-basierter Ansatz zur Abschätzung von Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess			x	x			
2	Ahmadinejad & Afshar (2014) *	Änderungsausbreitung in mechatronischen Produkten unter Berücksichtigung von Kosten			x				x
3	Bauer et al. (2015) *	Analyse der Änderungsausbreitung in Abhängigkeit von Änderungsursachen	x			x			
4	Belt et al. (2015) *	Kombination von Discrete-Choice-Analyse und CPM zur Abwägung zwischen Änderungsauswirkung und wirtschaftlichem Nutzen	x			x			
5	Chen et al. (2015) *	Attribut-basierter und objektorientierter Ansatz zur Auswirkungsanalyse von Produktvarianten	x						x
6	Cheng & Chu (2012) **	Netzwerkbasierter Bewertungsansatz für Änderungsauswirkungen	x					x	
7	Clarkson et al. 2001 (2001) **	CPM: DSM-basierte Methode zur Vorhersage von Änderungsausbreitung, -auswirkung und -risiko	x			x			
8	Cohen et al. (2000) **	C-FAR: Bewertung der Änderungsausbreitung basierend auf STEP Datenmodell und EX-PRESS Modellierung	x			x			
9	Conrad et al. (2007) **	CIRA: Bewertung von Änderungsauswirkung und -risiko durch eine Kombination aus dem CPM/PDD-Ansatz und der FMEA-Methode			x				x
10	Do et al. (2002) **	Ansatz zur konsistenten Repräsentation von Produkt- und Produktstrukturdaten	x				x		
11	Fei et al. (2011) 2011 **	Methode zur Analyse von Änderungsauswirkungen und wissensbasierte Auflösung von Widersprüchen im Entwurf (TRIZ)	x			x			
12	Flanagan et al. (2003) **	Modell zur Bestimmung der Änderungsausbreitung auf Komponenten- und Funktions-Ebenen	x			x			

Quellen	Kurzbeschreibung	Erhebung			Modellierung			
		I	D	-	M	DB	N	a
13 Hamraz et al. (2013c)*	Integration von Schnittstelleninformationen in die „Change Prediction Method“ (CPM)		x		x			
14 Hamraz (2013)*	Detaillierung des Produktmodells der CPM mit einem „functional-behaviour-structure (FBS)“ Modell	x			x			
15 Huang et al. (2000)**	Methode zur Bewertung der Änderungsauswirkungen basierend auf einem Erfassungsbogen	x						x
16 Kim et al. (2013)*	Analyse der Änderungsausbreitung auf die Nachhaltigkeit von Produktentwürfen	x			x			
17 Kocar & Akgunduz (2010)**	ADVICE: Virtuelle Umgebung für das Änderungsmanagement zur Priorisierung und Vorhersage von Änderungsauswirkungen		x			x		
18 Koh et al. (2012)*	Kombination des House of Quality und der CPM zur Bewertung der Änderungsauswirkung	x			x			
19 Lee et al. (2007)**	Kennzahlbasierte Bewertung der Änderungsauswirkung in modularen Produkten	x						x
20 Lee et al. (2010)**	Ansatz basierend auf dem analytischen Netzwerkprozess (ANP) zur Bestimmung einer relativen Änderungsauswirkung für modulare Produkte	x			x			
21 Li & Chen (2014)*	Identifikation von Clustern und Schnittstellen von Änderungsauswirkungen	x			x			
22 Li et al. (2008)*	Gewichtetes Netzwerkmodell zur Identifikation von direkten, korrelierenden und zusätzlichen Änderungen			x				x
23 Ma et al. (2003)**	Analyse von Änderungsauswirkungen auf Basis eines Informationsmodells mit den Domänen Produkt, Prozess & Organisation			x	x			
24 Ma et al. (2008)**	UML-basiertes Produktstrukturmodell mit Algorithmus zur Bestimmung der Änderungsausbreitung			x		x		x
25 Maier et al. (2014)*	Simulation von Änderungsaufwänden in einer ereignisorientierten Simulation zur Priorisierung von Änderungen.	x			x			
26 Morkos & Summers (2010)**	Änderungsausbreitung aufgrund von Anforderungsänderungen: Industrie Fallstudie		x		x			
27 Ollinger & Stahovich (2001)**	RedesignIT: Tool zur modellgestützten Generierung und Bewertung von Änderungsvorschlägen durch Variierung der Gestaltungsparameter	x					x	
28 Ouertani et al. (2004)**	Spezifizierung von Abhängigkeiten zwischen und innerhalb von Informationssystemen	x						x
29 Raffaelli et al. (2007)**	Tool zur Bestimmung der Änderungsausbreitung in modularen Produkten	x				x		
30 Reddi & Moon (2009)**	Identifikation betroffener Komponenten und Mitarbeiter basierend auf Änderungstyp und -wahrscheinlichkeit	x				x		

	Quellen	Kurzbeschreibung	Erhebung			Modellierung			
			I	D	-	M	DB	N	a
31	Rouibah & Caskey (2003) **	Änderungsmanagement im Simultaneous Engineering aus Parametersicht			x		x		
32	Rutka et al. (2006) **	CPA: Methode zur Analyse von Änderungsauswirkungen in der Flugzeugentwicklung	x			x			
33	Yang & Duan (2012) *	Methode zur Suche nach Ausbreitungspfaden von Änderungen auf Grundlage eines parameter-basierten Produktmodells	x					x	
34	Shankar et al. (2014) *	7-stufiges Vorgehen zur Minimierung der Effekte der Änderungsausbreitung auf den Validierungs-, Verifizierungs- und Testplan	x			x			

Legende: *eigene Recherche; ** Studie von Hamraz et al. (2013)

interviewbasierte (I), datenbasierte (B) und andere Methoden (-) der Erhebung

matrixbasierte (M), datenbankbasierte (DB), netzwerk-/graphbasierte (N) oder andere (a) Modellierung

Literaturstudie: A posteriori Analyse von Änderungsstrukturen

Die Tabelle 10-3 stellt die Ergebnisse einer systematischen und umfangreichen Literaturrecherche auf dem Gebiet der a posteriori Analyse von Änderungsstrukturen dar. Es werden insbesondere Ansätze basierend auf einer Datenanalyse referenziert. Für die Recherche wurden die Literaturdatenbanken ScienceDirect, SCOPUS, Web of Science und Google Scholar verwendet. Die Ansätze sind in der Tabelle entsprechend ihrer Analyseart, ihrem Analyseumfang und -gegenstand sowie dem Ziel der Analyse aufgeführt.

Tabelle 10-3: Literaturstudie: Ansätze zur a posteriori Analyse von Änderungsauswirkungen (Produktstruktur)

Quellen	Analyseart	Analyseumfang/-gegenstand	Ziel der Analyse
Ahmed-Kristensen & Kanike (2007)	Statistische Analyse	Ursachen, Phase im Entwicklungsprozess (auf Basis von Änderungsanträgen)	Erkenntnisse über die Verteilung von Änderungsursachen in den Phasen des Entwicklungsprozesses
Chang et al. (2011)	Statistische Analyse	Zusammenhang von Ursachen und Änderungskosten in der Produktionsphase	Beurteilung der Entwicklungsleistung durch Ableitung der Kosten-, Ursachen- und Änderungsstruktur
Elezi et al. (2011)	Knowledge Discovery in Databases (KDD)	Status der Änderung, Durchlaufzeit je Phase, Änderungsbeschreibung	Identifikation von Ursachen für Iterationen in Änderungsprozessen, um diese zukünftig zu vermeiden
Giffin et al. (2009)	Strukturelle Analyse (Data Mining)	Änderungsnetzwerke, -muster und -ausbreitung im Zeitverlauf (basierend auf Änderungsumfang und Status)	Allgemeine Erkenntnisse über Eigenschaften von Änderungen und deren Ausbreitung für spätere Entwicklungsprojekte
Pasqual & de Weck (2012)	Netzwerkanalyse	Änderungsausbreitung auf Produkt-, Änderungs- und Mitarbeitererebene (selber Datensatz wie Giffin et al., 2009)	Erzielung eines proaktiven Änderungsmanagements durch Nutzung von Erkenntnissen bezüglich des Änderungsfortpflanzungsverhalten
Reichwald & Conrat Niemerg, J. (1996)	Statistische Analysen	Gekoppelte Analyse von Anzahl, Kosten und Ursachen von Änderungen	Vermeidung von Fehlern, Unterstützung bei der Bewertung, Entscheidung, Planung, Steuerung und Kontrolle von Änderungen
Rowell et al. (2009)	Statistische Analyse	Ursachen, Dauer, Initiatoren (extern, intern), Auswirkungsbereiche	Erkenntnisgewinn über die Erscheinungsform von Änderungen
Sharafi (2013)	Knowledge Discovery in Databases (KDD)	Alle verfügbaren Daten (aus einer Änderungsdatenbank eines Unternehmens)	Identifikation von Mustern zur Verbesserung des Änderungsmanagements und der Entwicklung
Siddiqi et al. (2011)	Statistische Analyse	Zeitpunkt, Initiator (i.S.v. Herkunft) und Kosten	Verständnis über Änderungsaktivitäten in komplexen Systemen zur Nutzung in zukünftigen Produktentwicklungen
Sudin & Ahmed (2009)	Statistische Analysen	Initiator, Phasen, geänderte Produkteigenschaften (Änderungsanträge)	Erkenntnisse über Änderungen der Produktspezifikation bzgl. Produktlebenszyklusphase, Treiber, Eigenschaften und Initiatoren
Vianello & Ahmed (2008)	Statistische Analysen	Ursachen und Entwicklungsphase	Verständnis über Änderungen in der Servicephase und deren Relation zum Entwicklungsprozess zur Verbesserung diesbezüglicher Entwicklungsaktivitäten

Bewertung: Ansätze aus dem Stand der Forschung und Technik

Nachfolgend findet sich eine detaillierte Bewertung der Ansätze aus dem Stand der Forschung und Technik hinsichtlich der Erfüllung von Anforderungen dieser Dissertation (vgl. Kapitel 4).

Tabelle 10-4: Bewertung des Ansatzes von Kocar & Akgunduz (2010) anhand der Anforderungen

Kategorie	Anforderung	Kocar & Akgunduz (2010)
1. Input-orientierte Anforderungen	1.1 Breites Produktspektrum	● Exemplarische Anwendung an einem einfachen Beispiel eines Bürotisches mit 43 Komponenten. Prinzipiell auch für komplexe Produkte geeignet.
	1.2 Verschiedene Änderungsarten	● Differenzierung zwischen Material-, Geometrie- oder Dimensionsänderung.
	1.3 Verschiedene Granularitätslevel	○ Ein Level innerhalb der Produktstruktur.
	1.4 Verwendung verfügbarer Daten u. Informationen	● Verwendung von vorhanden Änderungsdaten, Stückliste und Daten in PDM/ERP-Systemen.
2. Anforderungen an Modell und Modellierung	2.1 Produktmodellierung	○ Keine explizite Modellierung des Produkts; Verwendung von Daten aus dem PDM System.
	2.2 Änderungsausbreitung	○ Nur einzelne Zusammenhänge, keine vollständige Modellierung.
	2.3 Änderungsmodellierung	○ Keine explizite Modellierung der Änderung; Verwendung von Änderungsdaten.
	2.4 Genauigkeit	● Prinzipiell abhängig von zugrundeliegender Änderungsdatenbasis; wg. Regularien ist diese als gut zu bewerten.
	2.5 Konsistenz	● Sehr hoch, da direkt auf Daten zugegriffen wird und keine Quelle für Inkonsistenzen vorhanden ist.
	2.6 Kompatibilität	○ Nicht kompatibel zu weiteren Methoden zur Änderungsanalyse, bspw. CPM.
3. Anwendungsorientierte Anforderungen	3.1 Einfache Anwendung/Automatisierung	● Einfache Nutzung durch Prozessintegration und Nutzung von Benutzereingaben; Ergebnisdarstellung in Softwareumgebung.
	3.2 Verfügbarkeit benötigter Software	○ Entwickelte Software (ADVICE) ist nicht verfügbar, nutzt u. a. den MINEP Algorithmus.
	3.3 Industrielle Anwendbarkeit	● Priorisierung anhand eines Kriteriums erscheint nicht ausreichend für Industrie (-); Vorschläge für Ausbreitung auf Basis vergangener Daten (++)
	3.4 Flexibilität	● Sehr flexibel, da auf eigentliche Modellbildung verzichtet wird und direkt Daten verwendet werden.
4. Ergebnisorientierte Anforderungen	4.1 Nutzbarkeit der Ergebnisse	● Hoch: Da Vorschläge zur Priorisierung und Änderungsausbreitung im Änderungsprozess verfügbar.
	4.2 Quantität der Ergebnisse	● Priorisierung und Änderungsausbreitung für einen konkreten Änderungsfall, keine weiteren Analysen bspw. hinsichtlich der Vermeidung und Vorverlagerung.
	4.3 Qualität der Ergebnisse	● Hoch: Differenzierung zwischen Änderungsfällen, Zugriff auf aktuelle Datenbasis.
	4.4 Aufwand/Nutzen-Verhältnis	● Moderater Nutzen, da nur für einzelne Änderungen; Aufwand für Einführung des Systems ebenfalls moderat.

Legende: ○ = nicht erfüllt; ● = teilweise erfüllt ● = erfüllt; - = keine Bewertung möglich

Tabelle 10-5: Bewertung des Ansatzes von Morkos et al. (2012) anhand der Anforderungen

Kategorie	Anforderung	Morkos et al. (2012)
1. Input-orientierte Anforderungen	1.1 Breites Produktspektrum	Breite Anwendbarkeit; gezeigt in zwei Case Studies mit komplexen Produkten (Automatisierungsbranche, Katalysatorhersteller). ●
	1.2 Verschiedene Änderungsarten	○ Nur Anforderungsänderungen ohne weitere Spezifizierung.
	1.3 Verschiedene Granularitätslevel	○ Keine verschiedenen Granularitätslevel berücksichtigt.
	1.4 Verwendung verfügbarer Daten u. Informationen	● Anforderungslisten sind im Normalfall gut dokumentiert.
2. Anforderungen an Modell und Modellierung	2.1 Produktmodellierung	○ Keine Modellierung des Produkts; lediglich der Anforderungen.
	2.2 Änderungsausbreitung	● Zusammenhänge zwischen Anforderungen auf Basis von Keywords bzw. der in den Anforderungen genannten Objekte. Keine Quantifizierung der Zusammenhänge.
	2.3 Änderungsmodellierung	○ Keine explizite Modellierung der Änderung.
	2.4 Genauigkeit	○ Hängt stark von der Formulierung der Anforderungen ab bzw. der Bestimmung und Zuordnung von Keywords.
	2.5 Konsistenz	○ Kein Konsistenzcheck, Änderungen schwer nachvollziehbar.
	2.6 Kompatibilität	○ DSM-basierte Methode; keine Wahrscheinlichkeit zur Ausbreitung, dadurch einige Methoden nicht möglich.
3. Anwendungsorientierte Anforderungen	3.1 Einfache Anwendung/ Automatisierung	● Fehlende Priorisierung erschwert Nutzung. Einfach (DSM mit Anforderungen), aber ohne Automatisierung.
	3.2 Verfügbarkeit benötigter Software	● Benötigt werden DSM-Tools, alternativ Tabellenkalkulationsprogramme.
	3.3 Industrielle Anwendbarkeit	○ Fehlende Priorisierung führt zu vielen gleichwertigen Ausbreitungsmöglichkeiten.
	3.4 Flexibilität	○ Durchschnittliche Flexibilität; bei Änderungen müssen Abhängigkeiten erneuert werden.
4. Ergebnisorientierte Anforderungen	4.1 Nutzbarkeit der Ergebnisse	○ Moderat: Da sehr viele mögliche Ausbreitungen in 2. Ordnung entstehen.
	4.2 Quantität der Ergebnisse	○ Nur Änderungsausbreitungen 2. Ordnung. Keine weiteren Analysen oder Priorisierung.
	4.3 Qualität der Ergebnisse	○ Keine präzise Vorhersage der Ausbreitungsmöglichkeit; viele Möglichkeiten ohne Priorisierung.
	4.4 Aufwand/Nutzen-Verhältnis	○ Einfach umsetzbar, lediglich eine DSM mit Anforderungen; Nutzen aufgrund der Ergebnisqualität erscheint relativ gering.

Legende: ○ = nicht erfüllt; ● = teilweise erfüllt ● = erfüllt; - = keine Bewertung möglich

Tabelle 10-6: Bewertung des Ansatzes von Hamraz et al. (2013c) anhand der Anforderungen

Kategorie	Anforderung	Hamraz et al. (2013c)
1. Input-orientierte Anforderungen	1.1 Breites Produktspektrum	○ Breites Anwendungsspektrum; beispielhaft für Flugsimulator durchgeführt. Für komplexe Produkte weniger gut geeignet.
	1.2 Verschiedene Änderungsarten	● Verschiedene Spezifizierungen von Änderungen möglich (bspw. geometrisch, energetisch).
	1.3 Verschiedene Granularitätslevel	○ Keine verschiedenen Granularitätslevel. Modellierung erfolgt auf Level der Komponenten.
	1.4 Verwendung verfügbarer Daten u. Informationen	● Schnittstellen-Informationen sind häufig nicht vollständig vorhanden (bspw. durch ICM); ggf. Erheben der Informationen notwendig.
2. Anforderungen an Modell und Modellierung	2.1 Produktmodellierung	○ Modellierung auf Komponentenebene. Zusammenhänge innerhalb der Produktstruktur werden nicht erfasst.
	2.2 Änderungsausbreitung	● Numerische Zusammenhänge: Wahrscheinlichkeit für Ausbreitung und Auswirkungen.
	2.3 Änderungsmodellierung	● Änderungen mit Attributen (z. B. geometrisch, energetisch).
	2.4 Genauigkeit	● Hängt stark von den hinterlegten Gleichungen und Annahmen über Verläufe ab.
	2.5 Konsistenz	● Keine Quelle für Inkonsistenzen vorhanden.
	2.6 Kompatibilität	● DSM-basierte Methode mit Wahrscheinlichkeit zur Ausbreitung; Nutzung weiterer Methoden möglich.
3. Anwendungsorientierte Anforderungen	3.1 Einfache Anwendung/Automatisierung	● Durchschnittlich; Berechnung starten, Objekte der Änderungsausbreitung identifizieren, Risiko aus DSM ablesen. Berechnungsmethode erscheint schwierig.
	3.2 Verfügbarkeit benötigter Software	● CAM Tool, basiert auf Java, ist frei verfügbar; in Kombination mit Tabellenkalkulationsprogramm.
	3.3 Industrielle Anwendbarkeit	- Nicht bewertbar aufgrund der vielen benötigten Daten, bspw. Schnittstellendaten.
	3.4 Flexibilität	○ Durchschnittliche Flexibilität; bei Änderungen müssen Abhängigkeiten erneuert werden: Eingangswerte, Vorgaben, evtl. Gleichungen.
4. Ergebnisorientierte Anforderungen	4.1 Nutzbarkeit der Ergebnisse	● Hoch: Auswirkungen und Wahrscheinlichkeit der Änderungsausbreitung.
	4.2 Quantität der Ergebnisse	● Hoch: Anschließende Risikoberechnung möglich.
	4.3 Qualität der Ergebnisse	- Keine Bewertung möglich; abhängig von der Übersetzung der Funktionen in Wahrscheinlichkeiten für die Änderungsausbreitung und -auswirkung.
	4.4 Aufwand/Nutzen-Verhältnis	○ Hoher Nutzen (numerische Änderungsausbreitung etc.), sehr hoher Aufwand (wenn Informationen aus ICM nicht vorhanden).

Legende: ○ = nicht erfüllt; ● = teilweise erfüllt ● = erfüllt; - = keine Bewertung möglich

Tabelle 10-7: Bewertung des Ansatzes von Giffin et al. (2009) anhand der Anforderungen

Kategorie	Anforderung	Giffin et al. (2009)
1. Input-orientierte Anforderungen	1.1 Breites Produktspektrum	● Breites Anwendungsspektrum; Sensorsystementwicklung mit Hardware, Software und Dokumentation.
	1.2 Verschiedene Änderungsarten	○ Keine Spezifizierungen der Änderung.
	1.3 Verschiedene Granularitätslevel	○ Nur auf Subsystem-Ebene.
	1.4 Verwendung verfügbarer Daten u. Informationen	● Verwendung dokumentierter Änderungen.
2. Anforderungen an Modell und Modellierung	2.1 Produktmodellierung	○ Modellierung auf Subsystem-Ebene. Keine Zusammenhänge innerhalb der Produktstruktur.
	2.2 Änderungsausbreitung	● Motifs und Häufigkeit von Zusammenhängen zwischen Subsystemen; Metriken; Abhängigkeiten zwischen Änderungen (Eltern-, Kinder- und Geschwisterbeziehungen).
	2.3 Änderungsmodellierung	○ Keine Berücksichtigung von Änderungsarten.
	2.4 Genauigkeit	● Hoch: Abhängig von Datenqualität der Änderungen.
	2.5 Konsistenz	● Keine Quelle für Inkonsistenzen vorhanden.
	2.6 Kompatibilität	● DSM-basierte Methode; keine Ausbreitungswahrscheinlichkeit; Nutzung weiterer Methoden möglich.
3. Anwendungsorientierte Anforderungen	3.1 Einfache Anwendung/Automatisierung	● Keine Unterstützung hinsichtlich der konkreten Verwendung der Ergebnisse; Ergebnisse sind Metriken, Motifs und Netzwerke. Erscheint nicht trivial; semi-automatische Modellierung.
	3.2 Verfügbarkeit benötigter Software	● CAM Tool und DSM; Data Mining Tool (keine spezifischen Angaben).
	3.3 Industrielle Anwendbarkeit	○ Moderat: relevante Zusammenhänge müssen aus Metriken und Netzwerken identifiziert werden. Keine Priorisierung von Zusammenhängen.
	3.4 Flexibilität	○ Änderungen oder Wiederverwendung sind nicht vorgesehen; einmalige Modellierung am Ende eines Projekts.
4. Ergebnisorientierte Anforderungen	4.1 Nutzbarkeit der Ergebnisse	● Mittel: Auftretenswahrscheinlichkeit von Änderungen, Abhängigkeiten und Metriken.
	4.2 Quantität der Ergebnisse	● Hoch: Motifs, Index für Änderungsausbreitung, Absorber und Reflektor im Änderungsnetzwerk.
	4.3 Qualität der Ergebnisse	○ Keine Angabe von Änderungs- und Ausbreitungswahrscheinlichkeiten.
	4.4 Aufwand/Nutzen-Verhältnis	● Moderater Nutzen (Häufigkeit von Änderungsausbreitung, keine Wahrscheinlichkeit etc.), moderater Aufwand (einmalige Modellierung mit verschiedenen Tools).

Legende: ○ = nicht erfüllt; ● = teilweise erfüllt ● = erfüllt; - = keine Bewertung möglich

Tabelle 10-8: Bewertung des Ansatzes von Pasqual & de Weck (2012) anhand der Anforderungen

Kategorie	Anforderung	Pasqual & de Weck (2012)
1. Input-orientierte Anforderungen	1.1 Breites Produktspektrum	● Breites Anwendungsspektrum; Sensorsystementwicklung mit Hardware, Software und Dokumentation.
	1.2 Verschiedene Änderungsarten	○ Keine Spezifizierungen der Änderung.
	1.3 Verschiedene Granularitätslevel	○ Nur auf Subsystem-Ebene.
	1.4 Verwendung verfügbarer Daten u. Informationen	● Verwendung dokumentierter Änderungen.
2. Anforderungen an Modell und Modellierung	2.1 Produktmodellierung	○ Modellierung auf Subsystem-Ebene. Zusammenhänge innerhalb der Produktstruktur werden nicht erfasst.
	2.2 Änderungsausbreitung	● Zusammenhänge (nicht numerisch) zwischen Subsystemen, Änderungen und Mitarbeitern/Rollen; Metriken; Abhängigkeiten zwischen Änderungen (Eltern-, Kinder- und Geschwisterbeziehungen).
	2.3 Änderungsmodellierung	○ Keine Differenzierung zwischen Änderungen.
	2.4 Genauigkeit	● Hoch: Abhängig von Datenqualität der Änderungen.
	2.5 Konsistenz	● Keine Quelle für Inkonsistenzen vorhanden.
	2.6 Kompatibilität	● DSM-basierte Methode; keine Ausbreitungswahrscheinlichkeit; Nutzung weiterer Methoden möglich.
3. Anwendungsorientierte Anforderungen	3.1 Einfache Anwendung/Automatisierung	● Keine Unterstützung hinsichtlich der konkreten Verwendung der Ergebnisse; Ergebnisse sind Metriken, Motifs und Netzwerke. Metriken auf Sozialebene fragwürdig; semi-automatische Modellierung.
	3.2 Verfügbarkeit benötigter Software	● CAM Tool und DSM; Data Mining Tool (keine spezifischeren Angaben).
	3.3 Industrielle Anwendbarkeit	○ Moderat: relevante Zusammenhänge müssen aus Metriken und Netzwerken identifiziert werden.
	3.4 Flexibilität	○ Änderungen oder Wiederverwendung sind nicht vorgesehen; einmalige Modellierung am Ende eines Projekts.
4. Ergebnisorientierte Anforderungen	4.1 Nutzbarkeit der Ergebnisse	● Mittel: Metriken und Abhängigkeiten zwischen/innerhalb Produkt-, Änderungs- und Sozialebene.
	4.2 Quantität der Ergebnisse	● Hoch: Motifs, Index für Änderungsausbreitung, Absorber und Reflektor im Änderungsnetzwerk auf Produkt- und Sozialebene, weitere Analysemethoden.
	4.3 Qualität der Ergebnisse	○ Keine Angabe von Änderungs- und Ausbreitungswahrscheinlichkeiten.
	4.4 Aufwand/Nutzen-Verhältnis	○ Moderater Nutzen (Motifs und Metriken), geringer Aufwand in Nutzung; Modellierung aufwendig.

Legende: ○ = nicht erfüllt; ● = teilweise erfüllt ● = erfüllt; - = keine Bewertung möglich

Tabelle 10-9: Bewertung des Ansatzes von Sharafi (2013) anhand der Anforderungen

Kategorie	Anforderung	Sharafi (2013)
1. Input-orientierte Anforderungen	1.1 Breites Produktspektrum	● Breites Anwendungsspektrum; Anwendung bei Automobilhersteller.
	1.2 Verschiedene Änderungsarten	○ Keine Spezifizierungen der Änderung.
	1.3 Verschiedene Granularitätslevel	○ Nur auf Ebene von Modulen.
	1.4 Verwendung verfügbarer Daten u. Informationen	● Verwendung dokumentierter Änderungen.
2. Anforderungen an Modell und Modellierung	2.1 Produktmodellierung	○ Modellierung auf Ebene von Modulen. Zusammenhänge innerhalb der Produktstruktur werden nicht erfasst.
	2.2 Änderungsausbreitung	● Zusammenhänge zwischen Modulen in Form von Regeln mit Wahrscheinlichkeiten und Signifikanz.
	2.3 Änderungsmodellierung	○ Keine Differenzierung zwischen Änderungen.
	2.4 Genauigkeit	● Hoch: Abhängig von Datenqualität der Änderungen.
	2.5 Konsistenz	● Keine Quelle für Inkonsistenzen vorhanden.
	2.6 Kompatibilität	○ Nicht kompatibel zu weiteren Methoden zur Änderungsanalyse, bspw. CPM.
3. Anwendungsorientierte Anforderungen	3.1 Einfache Anwendung/Automatisierung	● Anwendung von KDD oder DM-Tools, dadurch große Datenmengen verarbeitbar; einfache Nutzung von Regeln in Änderungsfällen.
	3.2 Verfügbarkeit benötigter Software	● Für die Nutzung ist keine Software nötig/Tools für KDD (RapidMiner) sind frei verfügbar für Universitäten; Unternehmen benötigen Lizenzen.
	3.3 Industrielle Anwendbarkeit	● Relevante Regeln werden über Maßzahlen priorisiert vorgeschlagen.
	3.4 Flexibilität	○ Änderungen oder Wiederverwendung sind nicht vorgesehen.
4. Ergebnisorientierte Anforderungen	4.1 Nutzbarkeit der Ergebnisse	● Mittel: Regeln für Änderungsausbreitung zwischen Modulen mit Wahrscheinlichkeiten.
	4.2 Quantität der Ergebnisse	○ Mittel: Einzelne Regeln mit Wahrscheinlichkeiten.
	4.3 Qualität der Ergebnisse	○ Keine Differenzierung zwischen Änderungsfällen, Zugriff auf aktuelle Datenbasis.
	4.4 Aufwand/Nutzen-Verhältnis	● Hoch: Nutzen hoch (priorisierte Regeln), geringer Aufwand der Modellierung.

Legende: ○ = nicht erfüllt; ◐ = teilweise erfüllt ● = erfüllt; - = keine Bewertung möglich

10.3 Ergänzungen zum Einsatz der Methodik und Evaluation

Assoziationsregeln aus Fallstudie 1

Assoziationsregeln für Änderungszusammenhänge auf Ebene der Baugruppen.

Tabelle 10-10: Generierte Assoziationsregeln aus dem Entwicklungsprojekt A des Automobilherstellers

	Prämisse	Konklusion	Support	Konfidenz	Lift
1	Baugruppe 140	Baugruppe 71	0,0041	0,875	22.528
2	Baugruppe 117	Baugruppe 18	0,0012	1	20.536
3	Baugruppe 139	Baugruppe 89	0,0012	1	246.429
4	Baugruppe 18 & 31	Baugruppe 30	0,0012	1	6.609
5	Baugruppe 30 & 27	Baugruppe 18	0,0017	1	20.536
6	Baugruppe 30 & 100	Baugruppe 18	0,0012	1	20.536
7	Baugruppe 18 & 100	Baugruppe 30	0,0012	1	6.609
8	Baugruppe 78 & 80	Baugruppe 30	0,0012	1	6.609
9	Baugruppe 18 & 71	Baugruppe 140	0,0017	1	215.625
10	Baugruppe 18 & 140	Baugruppe 71	0,0017	1	25.746
11	Baugruppe 18 & 66	Baugruppe 105	0,0012	1	52.273
12	Baugruppe 105 & 66	Baugruppe 18	0,0012	1	20.536
13	Baugruppe 28 & 48	Baugruppe 22	0,0012	1	69
14	Baugruppe 22 & 48	Baugruppe 28	0,0012	1	32.547
15	Baugruppe 21 & 27	Baugruppe 26	0,0012	1	123.214
16	Baugruppe 12 & 9	Baugruppe 11	0,0012	1	95.833
17	Baugruppe 9 & 11	Baugruppe 12	0,0012	1	47.917
18	Baugruppe 78 & 133	Baugruppe 132	0,0012	1	215.625
19	Baugruppe 78 & 133	Baugruppe 134	0,0012	1	287500
20	Baugruppe 132 & 134	Baugruppe 78	0,0012	1	69
21	Baugruppe 24 & 91	Baugruppe 148	0,0012	1	575
22	Baugruppe 24 & 148	Baugruppe 91	0,0012	1	215.625
23	Baugruppe 91 & 148	Baugruppe 24	0,0012	1	78.409
24	Baugruppe 33 & 64	Baugruppe 6	0,0012	1	101.471
25	Baugruppe 132 & 134	Baugruppe 133	0,0012	1	215.625
26	Baugruppe 78 & 133	Baugruppe 132 & 134	0,0012	1	862500
27	Baugruppe 78, 133 & 132	Baugruppe 134	0,0012	1	287500
28	Baugruppe 78, 133 & 134	Baugruppe 132	0,0012	1	216
29	Baugruppe 132 & 134	Baugruppe 78 & 133	0,0012	1	862,5
30	Baugruppe 78, 132 & 134	Baugruppe 133	0,0012	1	215.625
31	Baugruppe 133, 132 & 134	Baugruppe 78	0,0012	1	69

Anwendung der Assoziationsregeln aus Fallstudie 1

Anwendung der Assoziationsregeln aus Entwicklungsprojekt A für unterschiedliche Support- und Konfidenzwerte auf Änderungen in Projekt B.

Tabelle 10-11: Ergebnisse der Regelanwendung auf Änderungen in Projekt B für unterschiedliche Support- und Konfidenzwerte

Konfidenz	Support	False-positive-Rate	True-positive-Rate
1,0	0,005	-	-
	0,003	0,000	0,059
	0,001	0,011	0,057
0,9	0,005	0,005	0,727
	0,003	0,005	0,207
	0,001	0,017	0,080
0,8	0,005	0,005	0,727
	0,003	0,019	0,143
	0,001	0,034	0,083
0,7	0,005	0,009	0,696
	0,003	0,023	0,232
	0,001	0,061	0,111
0,6	0,005	0,009	0,696
	0,003	0,032	0,232
	0,001	0,099	0,100
0,5	0,005	0,009	0,696
	0,003	0,039	0,281
	0,001	0,154	0,106

Assoziationsregeln aus Fallstudie 2

Assoziationsregeln für Änderungszusammenhänge aus der Serienbetreuung des Motor R6 auf Komponentenebene.

Tabelle 10-12: Generierte Assoziationsregeln aus der Serienbetreuung des Motors R6

	Prämisse	Konklusion	Support	Konfidenz	Lift
1	Komponente 303	Komponente 304	0,0319	1	24,08
2	Komponente 131	Komponente 101	0,0256	1	26
3	Komponente 131	Komponente 104	0,0256	1	28
4	Komponente 101 & 104	Komponente 131	0,0256	1	39.125
5	Komponente 131 & 101	Komponente 104	0,0256	1	39.125
6	Komponente 101 & 131	Komponente 104	0,0256	1	28
7	Komponente 104 & 131	Komponente 101	0,0256	1	26
8	Komponente 401 & 441	Komponente 424	0,0256	1	35
9	Komponente 401 & 424	Komponente 441	0,0256	1	35
10	Komponente 441 & 424	Komponente 401	0,0256	1	35

Anwendung der Assoziationsregeln aus Fallstudie 2

Anwendung der Assoziationsregeln aus der Serienbetreuung des Motors R6 für unterschiedliche Support- und Konfidenzwerte auf Änderungen an Motor R6+.

Tabelle 10-13: Ergebnisse der Regelanwendung auf Änderungen in der Serienbetreuung von Motor R6+ für unterschiedliche Support und Konfidenzwerte

Konfidenz	Support	False-positive-Rate	True-positive-Rate
1,0	0,020	0,000	0,750
	0,010	0,000	0,757
	0,008	0,000	0,759
	0,005	0,013	0,797
	0,003	0,068	0,777
	0,001	0,068	0,777
	0,9	0,020	0,000
0,010		0,000	0,757
0,008		0,000	0,759
0,005		0,013	0,797
0,003		0,068	0,777
0,001		0,068	0,777

0,8	0,020	0,014	0,762
	0,010	0,285	0,790
	0,008	0,311	0,801
	0,005	0,507	0,815
	0,003	0,653	0,795
	0,001	0,653	0,795
0,7	0,020	0,024	0,769
	0,010	0,473	0,807
	0,008	0,544	0,833
	0,005	0,728	0,828
	0,003	0,826	0,803
	0,001	0,826	0,803

Matrixberechnung für R

Tabelle 10-14: Statistik-Programmierung der Matrixberechnungen in R

Befehle in R	
Allgemeines	<pre>setwd("C:/Änderungsanalysen") X<-read.table(file="clipboard-128",row.names=1,header=TRUE) Y<-as.matrix(X)</pre>
Absolute DSM	<pre>A<-crossprod(Y) write.table(A,file="Projekt1_abs.csv",sep=";",quote=FALSE,dec=".",row.names=TRUE,col.names=TRUE)</pre>
Support	<pre>B<-as.matrix(A) Sup<-B/dim(Y)[1] write.table(Sup,file="Projekt1_abs_sup.csv",sep=";",quote=FALSE,dec=".",row.names=TRUE,col.names=TRUE)</pre>
Konfidenz	<pre>D<-diag(B) Conf<-B/D write.table(Conf,file="Projekt1_abs_conf.csv",sep=";",quote=FALSE,dec=".",row.names=TRUE,col.names=TRUE) Conf[is.na(Conf)]<-0 /</pre>
Lift	<pre>Supdia<-diag(Sup) SD<-diag(1/Supdia) colnames(Lift)<-rownames(Lift) write.table(Lift,file="Projekt1_abs_lift.csv",sep=";",quote=FALSE,dec=".",row.names=TRUE,col.names=TRUE) Lift[is.na(Lift)]<-0</pre>

11. Dissertationsverzeichnis

Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching
Dissertationen betreut von

- Prof. Dr.-Ing. W. Rodenacker,
- Prof. Dr.-Ing. K. Ehrlenspiel und
- Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

- D1 COLLIN, H.:
Entwicklung eines Einwalzenkalenders nach einer systematischen Konstruktionsmethode. München: TU, Diss. 1969.
- D2 OTT, J.:
Untersuchungen und Vorrichtungen zum Offen-End-Spinnen.
München: TU, Diss. 1971.
- D3 STEINWACHS, H.:
Informationsgewinnung an bandförmigen Produkten für die Konstruktion der Produktmaschine.
München: TU, Diss. 1971.
- D4 SCHMETTOW, D.:
Entwicklung eines Rehabilitationsgerätes für Schwerstkörperbehinderte.
München: TU, Diss. 1972.
- D5 LUBITZSCH, W.:
Die Entwicklung eines Maschinensystems zur Verarbeitung von chemischen Endlosfasern.
München: TU, Diss. 1974.
- D6 SCHEITENBERGER, H.:
Entwurf und Optimierung eines Getriebesystems für einen Rotationsquerschneider mit allgemeingültigen Methoden.
München: TU, Diss. 1974.
- D7 BAUMGARTH, R.:
Die Vereinfachung von Geräten zur Konstanthaltung physikalischer Größen.
München: TU, Diss. 1976.
- D8 MAUDERER, E.:
Beitrag zum konstruktionsmethodischen Vorgehen durchgeführt am Beispiel eines Hochleistungsschalter-Antriebs.
München: TU, Diss. 1976.
- D9 SCHÄFER, J.:
Die Anwendung des methodischen Konstruierens auf verfahrenstechnische Aufgabenstellungen.
München: TU, Diss. 1977.
- D10 WEBER, J.:
Extruder mit Feststoffpumpe – Ein Beitrag zum Methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1978.
- D11 HEISIG, R.:
Längencodierer mit Hilfsbewegung.
München: TU, Diss. 1979.

- D12 KIEWERT, A.:
Systematische Erarbeitung von Hilfsmitteln zum kostenarmen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1979.
- D13 LINDEMANN, U.:
Systemtechnische Betrachtung des Konstruktionsprozesses unter besonderer Berücksichtigung der Herstellkostenbeeinflussung beim Festlegen der Gestalt.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1980. (Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften Reihe 1, Nr. 60).
Zugl. München: TU, Diss. 1980.
- D14 NJOYA, G.:
Untersuchungen zur Kinematik im Wälzlager bei synchron umlaufenden Innen- und Außenringen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D15 HENKEL, G.:
Theoretische und experimentelle Untersuchungen ebener konzentrisch gewellter Kreisringmembranen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D16 BALKEN, J.:
Systematische Entwicklung von Gleichlaufgelenken.
München: TU, Diss. 1981.
- D17 PETRA, H.:
Systematik, Erweiterung und Einschränkung von Lastausgleichslösungen für Standgetriebe mit zwei Leistungswegen – Ein Beitrag zum methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1981.
- D18 BAUMANN, G.:
Ein Kosteninformationssystem für die Gestaltungsphase im Betriebsmittelbau.
München: TU, Diss. 1982.
- D19 FISCHER, D.:
Kostenanalyse von Stirnzahnrädern. Erarbeitung und Vergleich von Hilfsmitteln zur Kostenfrüherkennung.
München: TU, Diss. 1983.
- D20 AUGUSTIN, W.:
Sicherheitstechnik und Konstruktionsmethodiken – Sicherheitsgerechtes Konstruieren.
Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz 1985. Zugl. München: TU, Diss. 1984.
- D21 RUTZ, A.:
Konstruieren als gedanklicher Prozess.
München: TU, Diss. 1985.
- D22 SAUERMAN, H. J.:
Eine Produktkostenplanung für Unternehmen des Maschinenbaues.
München: TU, Diss. 1986.
- D23 HAFNER, J.:
Entscheidungshilfen für das kostengünstige Konstruieren von Schweiß- und Gussgehäusen.
München: TU, Diss. 1987.
- D24 JOHN, T.:
Systematische Entwicklung von homokinetischen Wellenkupplungen.
München: TU, Diss. 1987.
- D25 FIGEL, K.:
Optimieren beim Konstruieren.
München: Hanser 1988. Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Figel, K.: Integration automatisierter Optimierungungsverfahren in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess.

Reihe Konstruktionstechnik München

- D26 TROPSCHUH, P. F.:
Rechnerunterstützung für das Projektieren mit Hilfe eines wissensbasierten Systems.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 1). Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d.
T.: Tropschuh, P. F.: Rechnerunterstützung für das Projektieren am Beispiel Schiffsgetriebe.
- D27 PICKEL, H.:
Kostenmodelle als Hilfsmittel zum Kostengünstigen Konstruieren.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 2). Zugl. München: TU, Diss. 1988.
- D28 KITTSTEINER, H.-J.:
Die Auswahl und Gestaltung von kostengünstigen Welle-Nabe-Verbindungen.
München: Hanser 1990. (Konstruktionstechnik München, Band 3). Zugl. München: TU, Diss. 1989.
- D29 HILLEBRAND, A.:
Ein Kosteninformationssystem für die Neukonstruktion mit der Möglichkeit zum Anschluss an ein CAD-
System.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 4). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D30 DYLLA, N.:
Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 5). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D31 MÜLLER, R.:
Datenbankgestützte Teileverwaltung und Wiederholteilsuche.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 6). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D32 NEESE, J.:
Methodik einer wissensbasierten Schadenanalyse am Beispiel Wälzlagerungen.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 7). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D33 SCHAAL, S.:
Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD – Am Beispiel der konstruktionsbegleitenden Kalkulation.
München: Hanser 1992. (Konstruktionstechnik München, Band 8). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D34 BRAUNSPERGER, M.:
Qualitätssicherung im Entwicklungsablauf – Konzept einer präventiven Qualitätssicherung für die Auto-
mobilindustrie.
München: Hanser 1993. (Konstruktionstechnik München, Band 9). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D35 FEICHTER, E.:
Systematischer Entwicklungsprozess am Beispiel von elastischen Radialversatzkupplungen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 10). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D36 WEINBRENNER, V.:
Produktlogik als Hilfsmittel zum Automatisieren von Varianten- und Anpassungskonstruktionen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 11). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D37 WACH, J. J.:
Problemspezifische Hilfsmittel für die Integrierte Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 12). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D38 LENK, E.:
Zur Problematik der technischen Bewertung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 13). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D39 STUFFER, R.:
Planung und Steuerung der Integrierten Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 14). Zugl. München: TU, Diss. 1993.

- D40 SCHIEBELER, R.:
Kostengünstig Konstruieren mit einer rechnergestützten Konstruktionsberatung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 15). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D41 BRUCKNER, J.:
Kostengünstige Wärmebehandlung durch Entscheidungsunterstützung in Konstruktion und Härterei.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 16). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D42 WELLNIAK, R.:
Das Produktmodell im rechnerintegrierten Konstruktionsarbeitsplatz.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 17). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D43 SCHLÜTER, A.:
Gestaltung von Schnappverbindungen für montagegerechte Produkte.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 18). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D44 WOLFRAM, M.:
Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 19). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D45 STOLZ, P.:
Aufbau technischer Informationssysteme in Konstruktion und Entwicklung am Beispiel eines elektronischen Zeichnungsarchives.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 20). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D46 STOLL, G.:
Montagegerechte Produkte mit feature-basiertem CAD.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 21). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D47 STEINER, J. M.:
Rechnergestütztes Kostensenken im praktischen Einsatz.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 22). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D48 HUBER, T.:
Senken von Montagezeiten und -kosten im Getriebebau.
München: Hanser 1995. (Konstruktionstechnik München, Band 23). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D49 DANNER, S.:
Ganzheitliches Anforderungsmanagement für marktorientierte Entwicklungsprozesse.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 24). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D50 MERAT, P.:
Rechnergestützte Auftragsabwicklung an einem Praxisbeispiel.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 25). Zugl. München: TU, Diss. 1996 u. d. T.: MERAT, P.: Rechnergestütztes Produktleitsystem
- D51 AMBROSY, S.:
Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1997. (Konstruktionstechnik München, Band 26). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D52 GIAPOULIS, A.:
Modelle für effektive Konstruktionsprozesse.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 27). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D53 STEINMEIER, E.:
Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der Pkw-Entwicklung
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 28). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D54 KLEEDÖRFER, R.:
Prozess- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 29). Zugl. München: TU, Diss. 1998.

- D55 GÜNTHER, J.:
Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 30). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D56 BIERSACK, H.:
Methode für Krafteinleitungsstellenkonstruktion in Blechstrukturen.
München: TU, Diss. 1998.
- D57 IRLINGER, R.:
Methoden und Werkzeuge zur nachvollziehbaren Dokumentation in der Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 31). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D58 EILETZ, R.:
Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Bsp. PKW-Entwicklung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 32). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D59 STÖSSER, R.:
Zielkostenmanagement in integrierten Produkterstellungsprozessen.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 33). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D60 PHLEPS, U.:
Recyclinggerechte Produktdefinition – Methodische Unterstützung für Upgrading und Verwertung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 34). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D61 BERNARD, R.:
Early Evaluation of Product Properties within the Integrated Product Development.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 35). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D62 ZANKER, W.:
Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 36). Zugl. München: TU, Diss. 1999.

Reihe Produktentwicklung München

- D63 ALLMANSBERGER, G.:
Erweiterung der Konstruktionsmethodik zur Unterstützung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 37). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D64 ASSMANN, G.:
Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 38). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D65 BICHLMAIER, C.:
Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 39). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D66 DEMERS, M. T.:
Methoden zur dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 40). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D67 STETTER, R.:
Method Implementation in Integrated Product Development.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 41). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D68 VIERTLBÖCK, M.:
Modell der Methoden- und Hilfsmiteleinführung im Bereich der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 42). Zugl. München: TU, Diss. 2000.

- D69 COLLIN, H.:
Management von Produkt-Informationen in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 43). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D70 REISCHL, C.:
Simulation von Produktkosten in der Entwicklungsphase.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 44). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D71 GAUL, H.-D.:
Verteilte Produktentwicklung - Perspektiven und Modell zur Optimierung.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 45). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D72 GIERHARDT, H.:
Global verteilte Produktentwicklungsprojekte – Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 46). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D73 SCHOEN, S.:
Gestaltung und Unterstützung von Community of Practice.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 47). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D74 BENDER, B.:
Zielorientiertes Kooperationsmanagement.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 48). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D75 SCHWANKL, L.:
Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 49). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D76 WULF, J.:
Elementarmethoden zur Lösungssuche.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 50). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D77 MÖRTL, M.:
Entwicklungsmanagement für langlebige, upgradinggerechte Produkte.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 51). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D78 GERST, M.:
Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 52). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D79 AMFT, M.:
Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung.
München: Dr. Hut 2003. (Produktentwicklung München, Band 53). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D80 FÖRSTER, M.:
Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus.
München: TU, Diss. 2003.
- D81 GRAMANN, J.:
Problemmodelle und Bionik als Methode.
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 55). Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D82 PULM, U.:
Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 56). Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D83 HUTTERER, P.:
Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die methodische Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 57). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D84 FUCHS, D.:
Konstruktionsprinzipien für die Problemanalyse in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 58). Zugl. München: TU, Diss. 2005.

- D85 PACHE, M.:
Sketching for Conceptual Design.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 59). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D86 BRAUN, T.:
Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 60). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D87 JUNG, C.:
Anforderungskklärung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 61). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D88 HEBLING, T.:
Einführung der Integrierten Produktpolitik in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 62). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D89 STRICKER, H.:
Bionik in der Produktentwicklung unter der Berücksichtigung menschlichen Verhaltens.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 63). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D90 NIBL, A.:
Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 64). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D91 MÜLLER, F.:
Intuitive digitale Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen.
München: Dr. Hut 2007. (Produktentwicklung München, Band 65). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D92 ERDELL, E.:
Methodenanwendung in der Hochbauplanung – Ergebnisse einer Schwachstellenanalyse.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 66). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D93 GAHR, A.:
Pfadkostenrechnung individualisierter Produkte.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 67). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D94 RENNER, I.:
Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung) Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D95 PONN, J.:
Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung) Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D96 HERFELD, U.:
Matrix-basierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und numerischer Simulation.
München: Dr. Hut 2007. (Produktentwicklung München, Band 70). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D97 SCHNEIDER, S.:
Model for the evaluation of engineering design methods.
München: Dr. Hut 2008 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D98 FELGEN, L.:
Systemorientierte Qualitätssicherung für mechatronische Produkte.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D99 GRIEB, J.:
Auswahl von Werkzeugen und Methoden für verteilte Produktentwicklungsprozesse.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.

- D100 MAURER, M.:
Structural Awareness in Complex Product Design.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D101 BAUMBERGER, C.:
Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D102 KEIJZER, W.:
Wandlungsfähigkeit von Entwicklungsnetzwerken – ein Modell am Beispiel der Automobilindustrie.
München: Dr. Hut 2007 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2007.
- D103 LORENZ, M.:
Handling of Strategic Uncertainties in Integrated Product Development.
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2008.
- D104 KREIMEYER, M.:
Structural Measurement System for Engineering Design Processes.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D105 DIEHL, H.:
Systemorientierte Visualisierung disziplinübergreifender Entwicklungsabhängigkeiten mechatronischer Automobilsysteme.
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D106 DICK, B.:
Untersuchung und Modell zur Beschreibung des Einsatzes bildlicher Produktmodelle durch Entwicklerteams in der Lösungssuche.
München: Dr. Hut 2009 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2009.
- D107 GAAG, A.:
Entwicklung einer Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D108 ZIRKLER, S.:
Transdisziplinäres Zielkostenmanagement komplexer mechatronischer Produkte.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D109 LAUER, W.:
Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in dynamischen Produktentwicklungsprozessen.
München: Dr. Hut 2010 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- D110 MEIWALD, T.:
Konzepte zum Schutz vor Produktpiraterie und unerwünschtem Know-how-Abfluss.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D111 ROELOFSEN, J.:
Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D112 PETERMANN, M.:
Schutz von Technologiewissen in der Investitionsgüterindustrie.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D113 GORBEA, C.:
Vehicle Architecture and Lifecycle Cost Analysis in a New Age of Architectural Competition.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D114 FILOUS, M.:
Lizenzierungsgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfaden zur Integration lizenzierungsrelevanter Aktivitäten in Produktentstehungsprozessen des Maschinen- und Anlagenbaus.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.

- D115 ANTON, T.:
Entwicklungs- und Einführungsmethodik für das Projektierungswerkzeug Pneumatiksimulation.
München: Dr. Hut 2011 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- D116 KESPER, H.:
Gestaltung von Produktvariantenspektren mittels matrixbasierter Methoden.
München: Dr. Hut 2012 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2012.
- D117 KIRSCHNER, R.:
Methodische Offene Produktentwicklung.
München: TU, Diss. 2012.
- D118 HEPERLE, C.:
Planung lebenszyklusgerechter Leistungsbündel.
München: Dr. Hut 2013 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2013.
- D119 HELLENBRAND, D.:
Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse.
München: Dr. Hut 2013 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2013.
- D120 EBERL, T.:
Charakterisierung und Gestaltung des Fahr-Erlebens der Längsführung von Elektrofahrzeugen.
München: TU, Diss. 2014.
- D121 KAIN, A.:
Methodik zur Umsetzung der Offenen Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2014 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D122 ILIE, D.:
Systematisiertes Ziele- und Anforderungsmanagement in der Fahrzeugentwicklung.
München: Dr. Hut 2013 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2013.
- D123 HELTEN, K.:
Einführung von Lean Development in mittelständische Unternehmen - Beschreibung, Erklärungsansatz
und Handlungsempfehlungen.
München: Dr. Hut 2015 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D124 SCHRÖER, B.:
Lösungskomponente Mensch. Nutzerseitige Handlungsmöglichkeiten als Bausteine für die kreative Ent-
wicklung von Interaktionslösungen.
München: TU, Diss. 2014.
- D125 KORTLER, S.:
Absicherung von Eigenschaften komplexer und variantenreicher Produkte in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2014 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D126 KOHN, A.:
Entwicklung einer Wissensbasis für die Arbeit mit Produktmodellen.
München: Dr. Hut 2014 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D127 FRANKE, S.:
Strategieorientierte Vorentwicklung komplexer Produkte – Prozesse und Methoden zur zielgerichteten
Komponentenentwicklung am Beispiel Pkw.
Göttingen: Cuvillier, E 2014. Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D128 HOOSHMAND, A.:
Solving Engineering Design Problems through a Combination of Generative Grammars and Simulations.
München: Dr. Hut 2014 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D129 KISSEL, M.:
Mustererkennung in komplexen Produktportfolios.
München: TU, Diss. 2014.

- D130 NIES, B.:
Nutzungsgerechte Dimensionierung des elektrischen Antriebssystems für Plug-In Hybride.
München: TU, Diss. 2014.
- D131 KIRNER, K.:
Zusammenhang zwischen Leistung in der Produktentwicklung und Variantenmanagement – Einflussmodell und Analyseverfahren.
München: Dr. Hut 2014 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D132 BIEDERMANN, W.:
A minimal set of network metrics for analysing mechatronic product concepts.
München: TU, Diss. 2015.
- D133 SCHENKL, S.:
Wissensorientierte Entwicklung von Produkt-Service-Systemen.
München: TU, Diss. 2015.
- D134 SCHRIEVERHOFF, P.:
Valuation of Adaptability in System Architecture.
München: Dr. Hut 2015 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2014.
- D135 METZLER, T.:
Models and Methods for the Systematic Integration of Cognitive Functions into Product Concepts.
München: Dr. Hut 2016 (Reihe Produktentwicklung).
- D136 DEUBZER, F.:
A Method for Product Architecture Management in Early Phases of Product Development.
München: TU, Diss. 2016.
- D137 SCHÖTTL, F.:
Komplexität in sozio-technischen Systemen - Methodik für die komplexitätsgerechte Systemgestaltung in der Automobilproduktion.
München: Dr. Hut 2016 (Reihe Produktentwicklung).
- D138 BRANDT, L. S.:
Architekturgesteuerte Elektrik/Elektronik Baukastenentwicklung im Automobil
München: TU, Diss. 2017.
- D139 BAUER, W.:
Planung und Entwicklung änderungsrobuster Plattformarchitekturen
München: Dr. Hut 2016 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2016.
- D140 ELEZI, F.:
Supporting the Design of Management Control Systems In Engineering Companies from Management Cybernetics Perspective
München: TU, Diss. 2015.
- D141 BEHNCKE, F. G. H.:
Beschaffungsgerechte Produktentwicklung – Abstimmung von Produktarchitektur und Liefernetzwerk in frühen Phasen der Entwicklung
TU München: 2015. (als Dissertation eingereicht)
- D142 ÖLMEZ, M.:
Individuelle Unterstützung von Entscheidungsprozessen bei der Entwicklung innovativer Produkte.
München: Dr. Hut 2017 (Reihe Produktentwicklung).
- D143 SAUCKEN, C. C. V.:
Entwicklerzentrierte Hilfsmittel zum Gestalten von Nutzererlebnissen.
München: Dr. Hut 2017 (Reihe Produktentwicklung).
- D144 KASPEREK, D.:
Structure-based System Dynamics Analysis of Engineering Design Processes
München: TU, Diss. 2016.

- D145 LANGER, S. F.:
Kritische Änderungen in der Produktentwicklung – Analyse und Maßnahmenableitung
München: Dr. Hut 2017 (Reihe Produktentwicklung).
- D146 HERBERG, A. P.:
Planung und Entwicklung multifunktionaler Kernmodule in komplexen Systemarchitekturen und –portfolios – Methodik zur Einnahme einer konsequent modulzentrierten Perspektive
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D147 HASHEMI FARZANEH, H.:
Bio-inspired design: Ideation in collaboration between mechanical engineers and biologists
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D148 HELMS, M. K.:
Biologische Publikationen als Ideengeber für das Lösen technischer Probleme in der Bionik
München: TU, Diss. 2017.
- D149 GÜRTLER, M. R.:
Situational Open Innovation – Enabling Boundary-Spanning Collaboration in Small and Medium-sized Enterprises
München: TU, Diss. 2016.
- D150 WICKEL, M. C.:
Änderungen besser managen – Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen
München: TU, Diss 2017.
- D151 DANILIDIS, C.:
Planungsleitfaden für die systematische Analyse und Verbesserung von Produktarchitekturen
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D152 MICHAILIDOU, I.:
Design the experience first: A scenario-based methodology for the design of complex, tangible consumer products
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D153 SCHMIDT, D.M.:
Increasing Customer Acceptance in Planning Product-Service Systems
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D154 ROTH, M.:
Efficient Safety Method Kit for User-driven Customization
TU München: 2016. (als Dissertation eingereicht)
- D155 PLÖTNER, M.:
Integriertes Vorgehen zur selbstindividualisierungsgerechten Produktstrukturplanung
TU München: 2017. (als Dissertation eingereicht)