

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Produktentwicklung

# **Strukturbasierte Koordinationsplanung in komplexen Entwicklungsprojekten**

**Nepomuk Alexander Heimberger**

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

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann  
2. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Die Dissertation wurde am 22.12.2016 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die promotionsführende Einrichtung Fakultät für Maschinenwesen  
am 13.06.2017 angenommen.



## **Zusammenfassung**

Die steigende Komplexität in Entwicklungsprojekten stellt die Koordination der Entwicklungsarbeit vor wachsende Herausforderungen. Diese Arbeit bildet ein erweitertes Verständnis über Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten und beschreibt einen rechnergestützten Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung. Der datengetriebene Ansatz unterstützt Projektmanager dabei, Koordinationsbedarfe in der Detaillierungsphase systematisch zu identifizieren und gezielt Koordinationsmaßnahmen zu definieren.

## **Summary**

The increasing complexity in engineering design projects leads to growing challenges for the coordination of development work. This thesis provides a broadened understanding of dependencies in product development projects and describes a computer-aided approach for structure-based coordination planning. The data-driven approach supports project managers to identify coordination needs within the detailed design phase systematically and to define targeted coordination measures.



# VORWORT DES BETREUERS

## **Problemstellung**

Das Projektmanagement in der Entwicklung technischer Produkte sieht sich mit einer steigenden Komplexität konfrontiert, welche zum Beispiel von der zunehmenden Modularisierung der Produkte, der Verkürzung der Entwicklungszeiten oder der steigenden Verteilung der Entwicklungsarbeit getrieben ist. Der Erfolg komplexer Entwicklungsprojekte hängt dabei maßgeblich vom reibungslosen Zusammenspiel aller Projektbeteiligter in ihrer Entwicklungsarbeit ab. Während es Aufgabe des Projektmanagements ist, dieses Zusammenspiel zu orchestrieren, stellt die Projektmanagement-Theorie keine Methoden zur gezielten Beherrschung der Projektkomplexität zur Verfügung. Als Folge wird die zielgerichtete Abstimmung bezüglich der vielen Abhängigkeiten den Projektbeteiligten mehr oder weniger selbst überlassen. Dies führt aufgrund des komplexitätsbedingt fehlenden Überblicks der Beteiligten dazu, dass notwendige Abstimmung nicht ausreichend oder gar nicht stattfindet, was wiederum zu Fehlern und Zusatzaufwänden in den Entwicklungsprojekten führt.

## **Zielsetzung**

Ausgehend von dieser Problemstellung lässt sich der Bedarf für weitere methodische Unterstützung für das Management komplexer Entwicklungsprojekte ableiten. Zum einen müssen dafür Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten besser verstanden werden, um diese systematisch erfassen zu können und beherrschbar zu machen. Zum anderen bedarf es einer Methodik, die die Analyse der Abhängigkeiten hinsichtlich notwendiger Abstimmungsbedarfe ermöglicht, um die notwendige Abstimmung in Entwicklungsprojekten aktiv zu planen und somit einen reibungslosen Ablauf zu begünstigen.

## **Ergebnisse**

Als Grundlage für einen Unterstützungsansatz werden in dieser Arbeit Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten charakterisiert und typische Herausforderungen der Koordination zusammengetragen. Der vorgestellte Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung ermöglicht es zudem mittels Rechnerunterstützung Abstimmungsbedarfe zu identifizieren, die aus Zusammenhängen auf Produktebene resultieren. Dabei wird angenommen, dass dank modellbasierter Entwicklung und zunehmender Digitalisierung der Entwicklungsarbeit die Datengrundlage für die Analyse zur Verfügung steht. Die identifizierten Abstimmungsbedarfe manifestieren sich einerseits auf Organisationsebene (wer mit wem?) und andererseits auf Prozessebene (wann über was?). Aus der gesamtheitlichen Betrachtung der Projektstruktur lässt sich darauf schließen, an welchen Stellen für das Projektmanagement besonderer Handlungsbedarf zur Koordination besteht. Durch die gezielte Definition von Koordinationsmaßnahmen wird die notwendige Abstimmung zwischen den Projektbeteiligten begünstigt und der Projekterfolg abgesichert.

### **Folgerungen für die industrielle Praxis**

Mit dem Ansatz der strukturbasierten Koordinationsplanung werden Unternehmen befähigt, die zielgerichtete Abstimmung in ihren komplexen Entwicklungsprojekten zu verbessern. Durch die rechnergestützte Analyse der Projektstruktur – basierend auf vorhandenen Daten über das zu entwickelnde Produkt, über die entwickelnde Organisation und über den Entwicklungsprozess – können quasi „auf Knopfdruck“ Abstimmungsbedarfe identifiziert werden. Dadurch kann das Risiko, entscheidende Abstimmungsbedarfe zu spät oder gar nicht zu erkennen, reduziert werden. Eine gezielte Interpretation der Analyseergebnisse ermöglicht es, geeignete Koordinationsmaßnahmen (z. B. Bildung cross-funktionaler Teams, Büroorganisation, Definition von Meilensteinen, etc.) bewusst zu ergreifen und damit die zielgerichtete Abstimmung zwischen den Projektbeteiligten sicherzustellen.

### **Folgerungen für Forschung und Wissenschaft**

Die vorliegende Arbeit liefert auf zwei Ebenen neue forschungsrelevante Erkenntnisse. Erstens zeigt die Charakterisierung von Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten, dass diese weitaus vielfältiger sind, als in verbreiteten Methoden des Managements von Entwicklungsprojekten angenommen wird. Die erarbeiteten Charakteristika und Messgrößen bilden eine wertvolle Grundlage für die weitergehende Erforschung von Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten und von Methoden für deren Beherrschung in komplexen Entwicklungsprojekten.

Zweitens werden in dieser Arbeit auf methodischer Ebene Ansätze des strukturellen Komplexitätsmanagements weiterentwickelt, indem sie mit modernen Methoden zur Analyse von Systemstrukturen kombiniert werden. Die auf vorhandenen Daten basierende, automatisierbare Modellierung von Projektsystemen in Datengraphen und deren strukturelle Analyse mittels Graphtransformation, wie sie im Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung aufgezeigt wird, erschließt neue Möglichkeiten Strukturanalysen in der industriellen Praxis verbreitet anzuwenden und zu verankern. Der vorgestellte Ansatz weist schließlich große Potentiale für weitergehende Anwendungsfälle zur integrierten Analyse von Produkt-, Prozess- und Organisationssystemen auf.

Garching, Januar 2018

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann  
TUM Emeritus of Excellence  
Lehrstuhl für Produktentwicklung  
Technische Universität München

## DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München im Zeitraum von August 2012 bis September 2016. An dieser Stelle will ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann meinen großen Dank aussprechen, der die Entstehung meiner Arbeit in dieser Zeit und darüber hinaus kontinuierlich begleitet hat. Er gab mir die Freiheit, mich neben spannenden Themen in laufenden Forschungsprojekten auch mit meinen eigenen Ideen intensiv auseinander zu setzen. Die offene Arbeitsatmosphäre am Lehrstuhl gab mir zudem die Möglichkeit, mich nicht nur fachlich weiterzuentwickeln, sondern auch persönliche Kompetenzen zu erweitern.

Besonderer Dank gilt außerdem den Personen, die mir stets mit Feedback und wertvollen Ratschlägen zu meiner Forschungsarbeit beiseite standen. Dazu gehören insbesondere Dr.-Ing. Clemens Hepperle, der meine Arbeit als TUM Graduate School Mentor intensiv begleitet hat. Prof. Tyson Browning nahm sich in mehreren Treffen viel Zeit, um meine Ideen mit mir zu diskutieren. Dr.-Ing. Martina Wickel war als langjährige Projektpartnerin im SFB 768 B1-Projekt eine meiner wichtigsten Forschungs-Sparringspartner und schenkte mir wertvolles Feedback in den letzten Zügen meiner Arbeit. Auch Dipl.-Ing. Christoph Hollauer war als langjähriger Bürokollege stetiger Diskussionspartner und Leidensgenosse der Prozessforschung. Zusätzlich danke ich Dr.-Ing. Stefan Langer, der mich nach der Betreuung meiner Diplomarbeit zur Promotion ermutigte und mich somit maßgeblich auf diesen Weg gebracht hat. Außerdem danke ich Dr.-Ing. Florian Behncke für zahlreiche, oft auch schon philosophische Gespräche.

Eine besondere Erfahrung und ein großer Fortschritt in meiner Forschungsarbeit waren mit meinem Gastaufenthalt am MIT verbunden. Ich danke insbesondere Dr. Eric Rebutisch, dass er den Aufenthalt für mich möglich gemacht hat und Dr. Bryan Moser für sein Feedback und inspirierende Ideen im Kontext meiner Forschungsarbeit.

Weiterhin danke ich dem Team rund um die Soley GmbH (vor allem Dr.-Ing. Bergen Helms und Dr.-Ing. Maximilian Kissel) dafür, dass sie mir ihre Software zur Verfügung stellten und mich bei der Anwendung stets unterstützten. Nicht zuletzt sei auch Karl Ruhland und der Firma BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH sowie dem TU Fast Eco Team dafür gedankt, dass sie sich bei der Evaluierung meines Unterstützungsansatzes engagiert haben.

Letztlich danke ich auch meiner wunderbaren Frau Franziska, meiner Familie und meinen Freunden für ihre ausdauernde Unterstützung und den stetigen Rückhalt, den mein Promotionsvorhaben von ihnen gefordert hat.



## VORVERÖFFENTLICHUNGEN (CHRONOLOGISCH)

### **Nepomuk Heimberger (geb. Chucholowski)**

Chucholowski, N.; Schöttl, F.; Bauer, W.; Schenkl, S. A.; Behncke, F. & Lindemann, U. (2015). A Process Taxonomy Model for Engineering Design Research. In Schabacker, M.; Gericke, K., N. Szélig, S. Vajna, & M. Schabacker (Hrsg.), *Modelling and Management of Engineering Processes. Proceedings of the 3rd International Conference 2013*. Heidelberg: Springer.

Chucholowski, N. & Lindemann, U. (2015). An Initial Metamodel to Evaluate Potentials for Graphbased Analyses of Product Development Projects. In *Proceedings of the 17th International DSM Conference* (S. 75–88). München: Carl Hanser.

Chucholowski, N.; Lehmer, K.; Rebentisch, E. & Lindemann, U. (2016b). Synchronization in Product Development Projects: A Literature Study on Challenges and Practices. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković, N. Bojčetić, & S. Skec (Hrsg.), *International Design Conference - DESIGN 2016* (S. 1465–1474)

Chucholowski, N.; Kriegler, J.; Hollauer, C.; Kattner, N.; Becerril, L.; Weidmann, D. & Lindemann, U. (2016a). Systematic Partitioning in Mechatronic Product Development by Modeling Structural Dependencies. In M. M. de Carvalho, S. D. Eppinger, M. Maurer, L. Becerril, & O. Z. de Souza (Hrsg.), *Proceedings of the 18th International DSM Conference. Sustainability in Modern Project Management* (S. 57–66)

Chucholowski, N.; Starke, P.; Moser, B. R.; Rebentisch, E. & Lindemann, U. (2016c). Characterizing and Measuring Activity Dependence in Engineering Projects. In *Proceedings of the Portland International Conference on Management of Engineering & Technology 2016*



## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

| <b>Abkürzung</b> | <b>Bedeutung</b>   |
|------------------|--|
| AHEAD            | Adaptable and Human-centered Environment for the Administration of Development Processes |
| BHS              | BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH  |
| BPMN             | Business Process Model and Notation  |
| CAD              | Computer Aided Design  |
| CAE              | Computer Aided Engineering   |
| CASE             | Computer Aided Software Engineering  |
| CAX              | Generelle Referenz auf rechnerunterstützte Systeme                                       |
| CCPM             | Critical Chain Project Management  |
| CPM              | Critical Path Method   |
| DMM              | Domain Mapping Matrix  |
| DRM              | Design Research Methodology  |
| DSM              | Design Structure Matrix  |
| EDM              | Engineering Data Management  |
| eEPK             | Erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette   |
| EFFB             | Extended Functional Flow Block Diagram   |
| EPK              | Ereignisgesteuerte Prozesskette  |
| ERP              | Enterprise Resource Planning   |
| FAS              | Fahrerassistenzsystem  |
| FF               | Finish to Finish   |
| FMC              | Fundamental Modeling Concepts  |
| FMEA             | Failure Mode and Effects Analysis  |
| FS               | Finish to Start  |
| INCOSE           | International Council on Systems Engineering   |
| MBSE             | Model-based Systems Engineering  |
| MDM              | Multiple Domain Matrix   |
| MIT              | Massachusetts Institute of Technology  |

| <b>Abkürzung</b> | <b>Bedeutung</b>                              |
|------------------|---|
| MVM              | Münchener Vorgehensmodell                     |
| OBS              | Organization Breakdown Structure              |
| OE               | Organisationseinheit                          |
| OMG              | Object Management Group                       |
| PAF              | Process Architecture Framework                |
| PDM              | Product Data Management                       |
| PERT             | Program Evaluation and Review Technique       |
| PLM              | Product Lifecycle Management                  |
| PMI              | Project Management Institute                  |
| PSS              | Produkt-Service System                        |
| QFD              | Quality Function Deployment                   |
| RACI             | Responsible, Accountable, Consulted, Informed |
| RAM              | Responsibility Assignment Matrix              |
| SADT             | Structured Analysis Design Technique          |
| SF               | Start to Finish                               |
| SIPOC            | Supplier, Input, Process, Output, Customer    |
| SS               | Start to Start                                |
| SSRC             | Sociotechnical Systems Research Center        |
| SysML            | Systems Modeling Language                     |
| TUM              | Technische Universität München                |
| WBS              | Work Breakdown Structure                      |

# INHALTSVERZEICHNIS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>                                       | <b>1</b>  |
| 1.1 Ausgangssituation und Motivation                       | 1         |
| 1.2 Problemstellung und Zielsetzung                        | 4         |
| 1.3 Thematische Einordnung                                 | 6         |
| 1.4 Übergeordnete Forschungsmethodik                       | 8         |
| 1.5 Aufbau der Arbeit                                      | 10        |
| <b>2. Theoretische Grundlagen</b>                          | <b>13</b> |
| 2.1 Grundlegende Begriffe                                  | 13        |
| 2.1.1 Systemsicht auf Entwicklungsprojekte                 | 13        |
| 2.1.2 Systemstrukturen                                     | 14        |
| 2.1.3 Komplexität in Entwicklungsprojekten                 | 16        |
| 2.1.4 Koordination und Koordinationsplanung                | 16        |
| 2.2 Integrierte Produktentwicklung und Systems Engineering | 18        |
| 2.2.1 Die Entwicklungsorganisation                         | 19        |
| 2.2.2 Der Entwicklungsprozess                              | 20        |
| 2.2.3 Struktur mechatronischer Systeme                     | 22        |
| 2.3 Koordination durch Prozess- und Projektmanagement      | 25        |
| 2.3.1 Prozessmanagement                                    | 25        |
| 2.3.2 Projektmanagement                                    | 27        |
| 2.4 Modellierung von Systemstrukturen                      | 29        |
| 2.4.1 Modelle als Basis des Systemdenkens                  | 29        |
| 2.4.2 Metamodelle als Basis formaler Modellierung          | 31        |
| 2.4.3 Repräsentation von Strukturmodellen                  | 32        |
| 2.5 Strukturelles Komplexitätsmanagement                   | 34        |
| 2.5.1 Graphentheorie und Netzwerktheorie                   | 34        |
| 2.5.2 Allgemeine Strukturmerkmale zur Systemanalyse        | 35        |
| 2.5.3 Methoden zur Strukturanalyse                         | 37        |

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3. Stand der Forschung und Technik</b>                              | <b>41</b> |
| 3.1 Vorhandene Modellierungsansätze und Modelle                        | 41        |
| 3.1.1 Produktsystem  | 41        |
| 3.1.2 Organisationssystem  | 47        |
| 3.1.3 Prozesssystem  | 49        |
| 3.1.4 Integrative Betrachtung von Produkt, Prozess und Organisation    | 54        |
| 3.2 Umgang mit Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten                 | 59        |
| 3.2.1 Charakterisierung von Abhängigkeiten                             | 60        |
| 3.2.2 Koordination   | 63        |
| 3.2.3 Synchronisationsmanagement                                       | 67        |
| 3.2.4 Fazit  | 68        |
| 3.3 Strukturbasierte Analyse von Projektsystemen                       | 69        |
| 3.3.1 Ableitung indirekter Zusammenhänge aus Strukturmodellen          | 70        |
| 3.3.2 Analyse struktureller Zusammenhänge                              | 71        |
| 3.3.3 Managementansätze auf Basis von Strukturmodellen                 | 72        |
| 3.3.4 Fazit  | 73        |
| 3.4 Datenmanagement in der Entwicklung                                 | 74        |
| 3.5 Zusammenfassung Unterstützungsbedarf                               | 74        |
| <b>4. Erweitertes Verständnis über Abhängigkeiten und Koordination</b> | <b>77</b> |
| 4.1 Arten von Abhängigkeiten   | 77        |
| 4.1.1 Technisch-logische Abhängigkeit                                  | 78        |
| 4.1.2 Organisatorisch-logische Abhängigkeit                            | 79        |
| 4.1.3 Ressourcenabhängigkeit   | 80        |
| 4.1.4 Soziale Abhängigkeit   | 80        |
| 4.2 Charakteristika und Messgrößen zur Beschreibung von Abhängigkeiten | 80        |
| 4.3 Grundlegende Herausforderungen der Koordination                    | 82        |
| <b>5. Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung</b>            | <b>87</b> |
| 5.1 Anforderungen an den Ansatz  | 87        |
| 5.2 Konzeption eines Basis-Metamodells für Projektsysteme              | 88        |
| 5.2.1 Überblick über das Basis-Metamodell                              | 89        |
| 5.2.2 Produktsystem  | 90        |

---

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 5.2.3     | Prozesssystem  | 91         |
| 5.2.4     | Organisationssystem  | 92         |
| 5.2.5     | Projektsystem  | 92         |
| 5.2.6     | Vorhandene Datenquellen  | 94         |
| 5.3       | Vorgehen zur strukturbasierten Koordinationsplanung            | 96         |
| 5.3.1     | Schritt 1: Vorbereitung  | 97         |
| 5.3.2     | Schritt 2: Integration   | 102        |
| 5.3.3     | Schritt 3: Analyse   | 103        |
| 5.3.4     | Schritt 4: Interpretation                                      | 115        |
| 5.4       | Diskussion des Ansatzes  | 122        |
| 5.5       | Erweiterungspotentiale   | 123        |
| 5.5.1     | Erweiterung der Datengrundlage                                 | 124        |
| 5.5.2     | Weitere Möglichkeiten zur strukturellen Analyse                | 125        |
| 5.5.3     | Weitere Visualisierungsmöglichkeiten der Ergebnisse            | 127        |
| 5.5.4     | Erweiterung des Anwendungskontexts                             | 127        |
| <b>6.</b> | <b>Evaluation</b>  | <b>129</b> |
| 6.1       | Evaluationsdesign  | 129        |
| 6.1.1     | Entwicklung eines Software-Prototypen zur Anwendungsevaluation | 129        |
| 6.1.2     | Workshop und Fragebogen zur Erfolgsevaluation                  | 130        |
| 6.2       | Fallstudie TUfast  | 131        |
| 6.2.1     | Schritt 1: Vorbereitung  | 133        |
| 6.2.2     | Schritt 2: Integration   | 136        |
| 6.2.3     | Schritt 3: Analyse   | 137        |
| 6.2.4     | Schritt 4: Interpretation – Feedback von TUfast                | 137        |
| 6.2.5     | Fazit  | 142        |
| 6.3       | Fallstudie Anlagenbau  | 142        |
| 6.3.1     | Schritt 1: Vorbereitung  | 144        |
| 6.3.2     | Schritt 2: Integration   | 146        |
| 6.3.3     | Schritt 3: Analyse   | 148        |
| 6.3.4     | Schritt 4: Interpretation – Feedback vom Industriepartner      | 149        |
| 6.3.5     | Fazit  | 153        |

---

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 6.4        | Ergebnisse der Fragebogenstudie                                       | 154        |
| 6.5        | Diskussion  | 157        |
| 6.5.1      | Reflexion   | 157        |
| 6.5.2      | Gesamtfazit   | 159        |
| <b>7.</b>  | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                   | <b>160</b> |
| 7.1        | Inhalt der Arbeit   | 160        |
| 7.2        | Ergebnisbeitrag für Forschung und Industrie                           | 162        |
| 7.3        | Ausblick  | 163        |
| <b>8.</b>  | <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>167</b> |
| <b>9.</b>  | <b>Anhang</b>   | <b>181</b> |
| 9.1        | Studienarbeitsverzeichnis   | 181        |
| 9.2        | Überblick über Expertengespräche                                      | 182        |
| 9.3        | Ergänzende Informationen zum illustrativen Beispiel LEGO Bagger       | 183        |
| 9.4        | Ergänzende Informationen zur Fallstudie TUfast                        | 192        |
| 9.5        | Ergänzende Informationen zur Fragebogenstudie                         | 195        |
| <b>10.</b> | <b>Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung</b> | <b>200</b> |

# 1. Einleitung

*Die Ausgangssituation dieser Arbeit ist durch eine zunehmende Komplexität heutiger Entwicklungsprojekte für technische Produkte geprägt. Fehlende oder unzureichende Koordination als Folge der Komplexität wird als eine der Hauptursachen für erhöhte Projektkosten und -dauer bzw. gescheiterte Projekte identifiziert, was die Motivation dieser Arbeit begründet. Daran anknüpfend werden im Einleitungskapitel die konkreten Problemstellungen und die Zielsetzung für diese Arbeit erläutert. Anschließend werden relevante Themenbereiche diskutiert und abgegrenzt. Abschließend wird die übergeordnete Forschungsmethodik beschrieben und ein Überblick über den Aufbau der Arbeit gegeben.*

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Entwicklung technischer Produkte sieht sich mit einem steigenden Grad an Komplexität konfrontiert [z. B. Marle & Vidal 2016, S. 53]. Komplexe Entwicklungsprojekte zeichnen sich durch eine hohe Anzahl von Elementen und eine große Vielfalt an Relationen zwischen den Elementen aus. Beteiligte Elemente sind hierbei (a) die unterschiedlichen Bestandteile und Schnittstellen des zu entwickelnden Produkts (Produktkomplexität), (b) die notwendigen Prozessschritte und Prozessstruktur zur Entwicklung des Produkts (Prozesskomplexität), und (c) die ausführenden Organisationseinheiten und dahinter liegende Organisationsstrukturen (Organisationskomplexität) [Lindemann *et al.* 2009, S. 5].

Typischerweise in der Literatur genannte Ursachen für die Steigerung der Komplexität in Entwicklungsprojekten sind in Abbildung 1-1 dargestellt [Blanchard & Blyler 2016, S. 9-11; Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 147-150; Lindemann *et al.* 2009, S. 27; Spath & Dangelmaier 2016, S. 3]. So führen zunehmend modularisierte Produktportfolios und integrierte Systeme (mechatronische Produkte, Produkt-Service Systeme) zu vielfältigen Abhängigkeiten auf Produktebene, die im Laufe der Produktentwicklung berücksichtigt werden müssen. Der steigende Marktdruck führt zu kürzeren Entwicklungszyklen, in denen häufig noch unklare Ziele mit einem hohen Grad an Arbeitsteilung und -parallelisierung [Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 149] in interdisziplinärer Zusammenarbeit umgesetzt werden sollen. Die Entwicklung findet dabei zunehmend verteilt statt, das heißt über mehrere Standorte hinweg bzw. gemeinsam mit externen Entwicklungspartnern [Moser *et al.* 2015, S. 2]. Außerdem laufen häufig mehrere Projekte gleichzeitig und sind zum Beispiel aufgrund geteilter Ressourcen oder gemeinsamer Ziele voneinander abhängig. Um die verschiedenen Prozesse und zeitlichen Abläufe zu koordinieren ist schließlich ein hoher Grad an interdisziplinärer und projektübergreifender Kommunikation und Synchronisation notwendig [Stetter & Pulm 2009, S. 103-106].

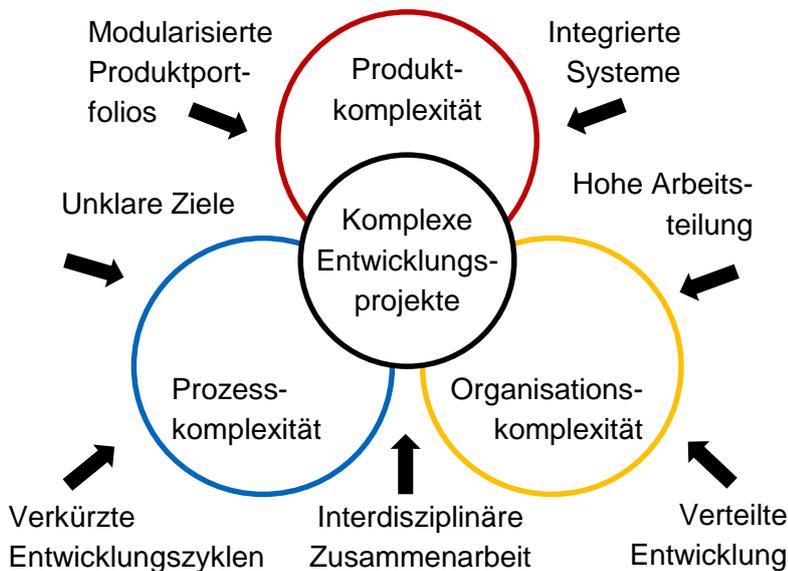


Abbildung 1-1 Facetten der Komplexität von Entwicklungsprojekten.

### Unzureichende oder fehlende Abstimmung ist einer der Hauptgründe für gescheiterte Projekte

Die Planung und Kontrolle der Entwicklungsarbeit liegt in der Regel in der Verantwortung des Projektmanagements. Das Projektmanagement erstellt Pläne zur Regelung der Entwicklungsarbeit und sorgt für eine erfolgreiche Umsetzung. Jedoch zeigen neben prominenten Beispielen wie der Bau des Berliner Flughafens BER<sup>1</sup> oder die Entwicklung der Boeing 787 „Dreamliner“ auch quantitative Studien, dass Projekte häufig ihre geplanten Ziele (Zeit, Kosten, Qualität) nicht erreichen. Einer aktuellen Studie des Project Management Institute (PMI) zufolge werden durchschnittlich weniger als die Hälfte aller Projekte im geplanten Zeitrahmen abgeschlossen, nur 53% bleiben im Budget und nur 62% erreichen ihre ursprünglich gesetzten Anforderungen bzw. Spezifikationen [PMI 2016, S. 5]. Im Schnitt werden 16% der Projekte als Misserfolg gewertet [PMI 2016, S. 5]. Die häufigsten Gründe werden dabei in Wechseln von Prioritäten bzw. Projektzielen oder in der unzureichenden bzw. unrealistischen Definition der Anforderungen und Ziele gesehen [PMI 2016, S. 23]. 30% der Studienteilnehmer gaben außerdem unzureichende oder fehlende Kommunikation als einen der drei wichtigsten Gründe für gescheiterte Projekte an [PMI 2016, S. 23]. Eine erfolgreiche Abstimmung diverser technischer Schnittstellen fehlte offensichtlich auch in den Beispielen des Berliner Flughafens und der Dreamliner-Entwicklung.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Der Bau des Berliner Flughafens ist ein technisches Großprojekt (Programm) und wird im Kontext dieser Arbeit als Beispiel für die Entwicklung eines komplexen technischen Systems verwendet.

<sup>2</sup> Im Fall des Berliner Flughafens wurden Mängel bezüglich der zentralen Computer-Steuerung als Grund angegeben. Diese konnte die Daten der Teilsysteme Brandmeldung, Brandbekämpfung und Rauchentfernung nicht ausreichend weiterverarbeiten [Scherff 2013]. Bei der Boeing 787 wurden Probleme mit der Passgenauigkeit von Zuliefer-Teilen als Gründe für Verzögerungen genannt [Wallace 2016], siehe auch [Calleam 2016].

Weitere Studien identifizieren ebenfalls unzureichende oder fehlende Abstimmung als ein wesentliches Problem [z. B. Schulze 2016, S. 177]. In einer Umfrage der Aberdeen Group gaben 68% der 140 teilnehmenden Unternehmen an, dass die Synchronisation der Entwicklungsprozesse eine Hauptherausforderung in der Entwicklung mechatronischer Produkte darstellt [Aberdeen Group 2006, S. 2]. In einer Studie der Boston Consulting Group gaben 25% der Befragten fehlende Koordination als eines der größten Hindernisse zur erfolgreichen Entwicklung von Innovationen an [Ringel *et al.* 2015, S. 8]. Aus diversen Fallstudien lässt sich ableiten, dass unzureichende Abstimmung die Qualität eines Produkts mindert und die Entwicklung verzögert [Crabtree *et al.* 1997; Gokpinar *et al.* 2010; Sosa *et al.* 2007]. Eine Studie über Kostentransparenz in der Mechatronik [Braun *et al.* 2007] zeigt weiterhin, dass aufwändige Koordination und Zusammenarbeit einen zentralen Kostentreiber darstellt [Hellenbrand 2013, S. 22]. Mehr als die Hälfte der Befragten gibt an, dass Abstimmungstätigkeiten ca. 20% ihrer Arbeitszeit ausmachen.

### **Digitalisierung als Chance zur Verbesserung der Entwicklungsarbeit**

Fortschritte in der Digitalisierung der Entwicklungsarbeit stellen dagegen in mehrfacher Hinsicht eine Chance zur Verbesserung dar. Die modellbasierte Entwicklung und integrierte Softwaresysteme wie z. B. PDM-/PLM- und ERP-Systeme ermöglichen es, relevante Daten über das zu entwickelnde Produkt und die Entwicklungsarbeit systematisch zu dokumentieren und weiterzuverwenden. Dadurch wird die Kommunikation und Zusammenarbeit deutlich erleichtert. Außerdem steht wichtiges Wissen gebündelt zur Verfügung, das ohne integrierte Systeme nur in den Köpfen einzelner Personen oder verteilt in zahlreichen Dokumenten und Dateien bestände.

Trotz der Verbesserung der Kommunikation und der Erleichterung der Zusammenarbeit garantieren die integrierten Softwaresysteme jedoch nicht, dass Kommunikation und Zusammenarbeit überhaupt stattfindet. Dass davon nicht immer ausgegangen werden kann, spiegelt sich in Aussagen von Interviewpartnern aus der Industrie wider, die im Rahmen eines Forschungsprojekts in Bezug auf Herausforderungen in der Entwicklung mechatronischer Produkte gesammelt wurden (Forschungsprojekt „A<sup>2</sup>TEMP“, vgl. Kapitel 1.4):

- Die Abstimmung zwischen den Disziplinen ist unkoordiniert bzw. nicht aktiv gesteuert, teilweise findet gar keine Kommunikation statt.
- Das Prozessverständnis fehlt.
- Die Aufbauorganisation (Unternehmen bzw. Projekte) und Prozesse sind nicht aufeinander abgestimmt.
- Verantwortlichkeiten sind unklar.

### **Wer muss sich wann mit wem über was abstimmen?**

Durch die üblicherweise historisch bedingte Aufteilung in technische Disziplinen wie Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software haben sich in vielen Unternehmen disziplinspezifische Entwicklungsprozesse etabliert [Gehrke 2005, S. 12]. Infolgedessen muss zur Ausnutzung der Synergien über eine verteilte, gleichzeitige Entwicklung sichergestellt werden, dass sämtliche Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Disziplinen beachtet werden [Isermann 2000, S. 31]. Die zunehmende Projektkomplexität erschwert es jedoch, den Überblick über Abhän-

gigkeiten im Projekt zu behalten und es mangelt an IT-Werkzeugen zur interdisziplinären Abstimmung und Synchronisation unterschiedlicher Fachdisziplinen [Eigner *et al.* 2012]. Aufgrund der Vielzahl und Vielfältigkeit der Zusammenhänge gewinnt deshalb insbesondere die Frage an Bedeutung: **Wer** muss sich **wann** mit **wem** über **was** abstimmen? Diese Fragestellung motiviert die Problemstellung und Zielsetzung dieser Arbeit.

## 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

### **Projektkomplexität führt zu fehlendem Überblick über notwendige Koordinationsbedarfe**

Wie in der Motivation beschrieben, führen mehrere Faktoren dazu, dass die Projektkomplexität steigt. Mit steigender Komplexität wird es immer schwieriger, den Überblick über alle Schnittstellen im zu entwickelnden Produkt, über alle Abhängigkeiten im Prozess und alle Zusammenhänge in der Organisation zu behalten. Klassische Fragen, die sich dann in einem Entwicklungsprojekt stellen, sind: Wie hängen die einzelnen Subsysteme des Produkts und ihre Eigenschaften miteinander zusammen? Wer führt welche Tätigkeiten durch? Wer ist für was verantwortlich? Von wem werden zur Durchführung einer Entwicklungsaktivität Informationen benötigt? Wann stehen diese zur Verfügung?

Gleichzeitig nimmt die erfolgreiche Zusammenarbeit über unterschiedliche Organisationseinheiten hinweg in heutigen Entwicklungsprojekten eine immer wichtigere Rolle ein. Bei den Organisationseinheiten handelt es sich beispielsweise um Teams unterschiedlicher Disziplinen, um Teams aus unterschiedlichen Projekten (Abstimmung ist aufgrund von Modul- und Plattformstrategien projektübergreifend notwendig) oder sogar aus unterschiedlichen Unternehmen (Verteilte Entwicklung, Entwicklungskooperationen, Wertschöpfungsnetzwerke).

Hab & Wagner [2013, S. 20] beschreiben die *Koordination & Integration* als einen von vier Schlüsseln zum erfolgreichen Management von Projekten (in der Automobilindustrie), wodurch erst die Basis für erfolgreiche *Kooperation & Interaktion* sowie *Kommunikation & Information* geschaffen wird. Zur Koordination ist es notwendig die **Abhängigkeiten im Entwicklungsprojekt** zu **kennen** und resultierende **Abstimmungsbedarfe** zu **erkennen**. Existierende Ansätze zum Management von Komplexität in Entwicklungsprojekten unterstützen die Analyse von Projektabhängigkeiten, basieren jedoch meist auf manuell erstellten Strukturmodellen, die nur vereinzelte Abhängigkeitsaspekte berücksichtigen.

### **Planung der Koordination ist kein expliziter Bestandteil im klassischen Projektmanagement**

Trotz häufig unzureichender bzw. fehlender Abstimmung ist die bewusste und systematische Planung der Koordination bisher kein expliziter Bestandteil heutiger Management-Praktiken (z. B. PMI, IPMA oder PRINCE<sup>3</sup>). Stattdessen wird die **Koordination der Entwicklungsarbeit** lediglich als operativer Bestandteil des Projektmanagements erwähnt und **nicht methodisch unterstützt**. Die Abstimmung innerhalb der Entwicklung wird als ein eingebetteter Teil der Entwicklungsarbeit verstanden und ist deshalb selten in Prozess- oder Projektplänen

---

<sup>3</sup> Project Management Institute (PMI) – [www.pmi.org](http://www.pmi.org); International Project Management Association (IPMA) - <http://www.ipma.world/>; Projects in Controlled Environments (PRINCE) - [www.prince2.com](http://www.prince2.com)

sichtbar bzw. expliziert. Vereinzelt Forschungsanstrengungen zur Unterstützung des Prozess- und Projektmanagements in der Produktentwicklung adressieren zwar insbesondere auch die Koordination (z. B. Kleedörfer [1999]; Negele *et al.* [2006]), die beschriebenen Unterstützungsmethoden sind jedoch in der industriellen Praxis wenig verbreitet. Außerdem fehlt weiterhin methodische Unterstützung zur systematischen Identifikation von projektspezifischen Abstimmungsbedarfen und daraus folgender Koordinationsbedarfe.

Folglich basiert die tatsächlich stattfindende Abstimmung während der Entwicklung hauptsächlich auf vorhandenen Teamstrukturen, generisch definierten Prozessabläufen, etablierten Abstimmungstreffen und dem Erfahrungsschatz der beteiligten Personen. Zeitliche Aufwände für die Abstimmung werden dabei implizit der Entwicklungsarbeit zugerechnet, sie werden bei der Abschätzung von Entwicklungsaufwänden jedoch selten berücksichtigt [Schlick *et al.* 2013, S. 510]. Das ist laut Moser & Halpin [2009, S. 5] auch ein Grund, warum die kalkulierten Zeitpläne des Projektmanagements so häufig die Realität weit verfehlen. Durch unzureichende oder gar fehlende Abstimmung entstehen außerdem Fehler und Nacharbeit. Insgesamt mangelt es also an Methoden und IT-Werkzeugen, die eine zielgerichtete Koordination in Entwicklungsprojekten unterstützen.

### **Zielsetzung und geplanter Lösungsansatz**

Basierend auf den dargestellten Problemstellungen ist folgende übergeordnete Fragestellung handlungsleitend für diese Arbeit:

*Wie kann die Koordination in komplexen Entwicklungsprojekten unterstützt werden, so dass das Risiko für fehlende oder unzureichende Abstimmung reduziert wird?*

Das Ziel dieser Arbeit ist es einen Ansatz zu entwickeln, der eine datengetriebene, rechnerbasierte Identifikation und Analyse von Abstimmungsbedarfen zur gezielten Planung von Koordination ermöglicht. Das Ziel stützt sich auf die Hypothese, dass eine systematische Koordinationsplanung das Risiko für unzureichende oder fehlende Abstimmung reduziert und folglich unnötiger Nacharbeit, Projektverzögerungen, Kostenüberschreitungen und Qualitätseinbußen vorbeugt.

Zur Bereitstellung eines fundierten Unterstützungsansatzes ist es zunächst notwendig, ein umfassendes Verständnis über Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten aufzubauen. Weiterhin ist zu klären, wie Projektelemente und entsprechende Abhängigkeiten grundsätzlich modelliert werden können und welche Modelle bzw. Daten in Entwicklungsprojekten zur Verfügung stehen. In Hinblick auf die notwendige Koordination ist es außerdem wichtig, grundlegende Herausforderungen der Koordination zu kennen, die eine effektive und effiziente Abstimmung erschweren.

Der zu entwickelnde Ansatz soll letztlich die strukturelle Analyse komplexer Entwicklungsprojekte ermöglichen, um Abstimmungsbedarfe identifizieren und priorisieren zu können. Dies soll den Anwender des Ansatzes bei der Planung von Koordinationsmaßnahmen unterstützen. Zusammenfassend werden folgende Forschungsfragen formuliert:

- **FF1:** Welche Abhängigkeiten gibt es innerhalb eines Projekts, die zu Abstimmungsbedarfen führen, und wie können diese charakterisiert werden?

- **FF2:** Wie können mögliche Abstimmungsbedarfe aus Projektdaten rechnerbasiert abgeleitet werden?
- **FF3:** Wie kann die Relevanz für notwendige Koordination in Bezug auf identifizierte Abstimmungsbedarfe strukturbasiert bewertet werden?
- **FF4:** Was sind typische Hürden für erfolgreiche Koordination und welche Koordinationsmechanismen gibt es?

### 1.3 Thematische Einordnung

Für eine thematische Einordnung dieser Arbeit werden relevante Themenbereiche und Betrachtungsgegenstände in diesem Kapitel voneinander abgegrenzt. Die wichtigste Abgrenzung ist dabei die der Forschungsdisziplinen. Die vorliegende Arbeit ist im Kontext der Ingenieurwissenschaften zu sehen. Die Betrachtung von Prozessen und Organisationen ist dabei in den Ingenieurwissenschaften zwar durchaus üblich, sie stellen jedoch Querschnittsthemen mit starken Überschneidungen zu den Betriebswissenschaften und zur Organisationsforschung dar. Das Thema Koordination ist darüber hinaus in den Sozialwissenschaften und Informationswissenschaften ein etabliertes Forschungsgebiet. Die Literaturrecherchen in dieser Arbeit fokussieren auf Veröffentlichungen aus den Ingenieurwissenschaften. Identifizierte Veröffentlichungen aus den anderen Forschungsdisziplinen werden jedoch mit berücksichtigt.

#### Fokussierte Themenbereiche

Hauptbetrachtungsgegenstand dieser Arbeit ist die Planung der Koordination in komplexen Entwicklungsprojekten (vgl. Abbildung 1-2). Mit Entwicklungsprojekten sind Projekte zur Entwicklung neuer technischer Produkte bis zur Marktreife gemeint (vgl. Marle & Vidal [2016, S. 1]). Im Fokus stehen verteilte Entwicklungsprojekte für mechatronische Produkte, die einen hohen Komplexitätsgrad aufweisen. Die Projekte werden im Kontext einer methodisch gestützten, integrierten Produktentwicklung (vgl. Ehrlenspiel & Meerkamm [2013]; Lindemann [2009]) und des Systems Engineering (vgl. Walden *et al.* [2015]) betrachtet. Außerdem bilden etablierte Ansätze des Prozess- und Projektmanagements den Betrachtungskontext für diese Arbeit, weil die Koordinationsplanung als Teilaufgabe des operativen Projektmanagements gesehen wird.

Die Betrachtungen in dieser Arbeit bauen darüber hinaus auf Grundlagen der Systemmodellierung und des strukturellen Komplexitätsmanagements auf. In diesem Sinne wird nicht nur das zu entwickelnde Produkt als komplexes System verstanden, sondern das gesamte Entwicklungsprojekt samt Entwicklungsprozess und -organisation (vgl. Browning *et al.* [2006])

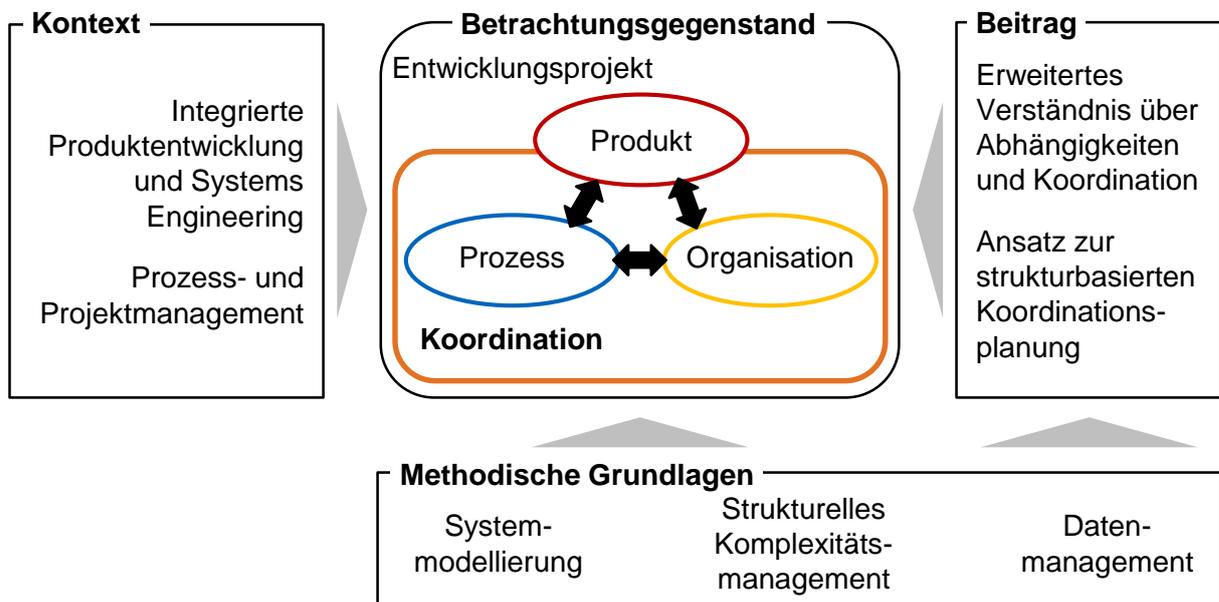


Abbildung 1-2 Relevante Themenbereiche für diese Arbeit.

### Abgrenzung des Beitrags der Arbeit

Der erwartete Beitrag der Arbeit besteht aus zwei Bausteinen. Zum einen soll ein Unterstützungsansatz zur Koordinationsplanung erarbeitet werden, auf Basis dessen Koordinationsmaßnahmen systematisch abgeleitet werden können. Zum anderen soll ein erweitertes Verständnis für Abhängigkeiten und Koordination in komplexen Entwicklungsprojekten geschaffen werden. Dadurch soll die Wissensgrundlage für eine explizite Planung der Koordination und deren Berücksichtigung im Projektmanagement ergänzt werden.

Der Fokus liegt vor allem auf technischen Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten und daraus resultierenden Abstimmungsbedarfen. Insgesamt zielt diese Arbeit darauf ab, das Risiko für unzureichende oder fehlende Abstimmung und damit das Risiko für ein Scheitern eines Projekts zu reduzieren. Es sei jedoch erwähnt, dass die Gründe für gescheiterte Projekte äußerst vielfältig sind. Neben Abstimmungsdefiziten scheint die unrealistische und fehlerhafte Planung der Projektziele (Projektumfang bzw. Anforderungen, Kosten- und Zeitabschätzung) ein wichtiger Grund zu sein (z. B. Ringel *et al.* [2015]). Hinzu kommt der einflussreiche Faktor Mensch. Ein Großteil der Fehler in Projekten entsteht laut interviewten Industrievertretern aufgrund fehlender Disziplin und weiteren menschlichen Aspekten. So halten sich Menschen nicht immer an definierte Prozesse, sie sind maßgeblich durch persönliche Ziele gesteuert (lokale Ziele vs. globales Optimum), oder sie haben persönliche Konflikte untereinander, was der Zusammenarbeit schadet. Weitere in der Praxis beobachtbare Ursachen sind fehlende Tools zur Unterstützung der Kommunikation und Zusammenarbeit bzw. deren fehlerhafte Anwendung. Diese Aspekte sind nicht Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit. Die Koordinationsplanung soll jedoch eine erfolgreiche Abstimmung begünstigen und damit indirekt die Kommunikation und Zusammenarbeit verbessern.

Der Unterstützungsansatz baut schließlich auf vorhandenen Modellierungsansätzen und Methoden des strukturellen Komplexitätsmanagements zur Systemanalyse auf. Um Entwicklungsprojektsysteme zur Koordinationsplanung strukturell analysieren zu können, müssen diese modelliert werden. Dafür soll im Rahmen dieser Arbeit ein grundlegendes Konzept für ein Metamodell zur Repräsentation von Projektdaten in Strukturmodellen erarbeitet werden, womit auch eine prototypische Implementierung des Ansatzes ermöglicht wird.

## 1.4 Übergeordnete Forschungsmethodik

Die vorliegende Forschungsarbeit ist überwiegend explorativer Natur und der Aktionsforschung zuzuschreiben. Das heißt, dass die identifizierten Problemstellungen und wissenschaftlichen Erkenntnisse auf Literaturrecherchen und Beobachtungen aus der Praxis basieren. Der Lösungsansatz wird iterativ mit Hilfe von Praxisbeispielen erarbeitet und wird initial evaluiert. Das grundlegende Vorgehen lässt sich anhand der Design Research Methodology (DRM) nach Blessing & Chakrabarti [2009] beschreiben. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Forschungsmaßnahmen sind in Tabelle 1-1 zusammengefasst und den vier Phasen der DRM zugeordnet.

*Tabelle 1-1 Einordnung der unterschiedlichen Forschungsmaßnahmen als übergeordnetes Vorgehen in die Kategorien der Design Research Methodology nach Blessing & Chakrabarti [2009].*

| <b>Maßnahme</b>   | <b>RC</b> | <b>DS I</b> | <b>PS</b> | <b>DS II</b> |
|---|-----------|-------------|-----------|--------------|
| <b>Allgemeiner Verständnisaufbau</b>  |           |             |           |              |
| 1 Experteninterviews (vgl. Anhang 9.2)  | X         |             |           |              |
| 2 Allgemeine explorative Literaturrecherchen  | X         | X           | X         |              |
| <b>Spezifischer Verständnisaufbau (FF1 und FF4)</b>   |           |             |           |              |
| 3 Explorative Fallstudien im Rahmen von A <sup>2</sup> TEMP   |           | X           |           |              |
| 4 Literaturrecherche zu Arten der Abhängigkeit  |           | X           |           |              |
| 5 Explorative Fallstudie zu Arten der Abhängigkeit  |           | X           | X         |              |
| 6 Literaturrecherche zu Charakteristika und Messgrößen  |           | X           | X         |              |
| 7 Experimentelle Studie zur Analyse des Nutzens und der Aussagekraft der identifizierten Charakteristika und Messgrößen |           |             |           | X            |
| 8 Literaturrecherche zu Herausforderungen der Koordination  |           | X           | X         |              |
| <b>Entwicklung und Evaluation des Lösungsansatzes (FF2 und FF3)</b>   |           |             |           |              |
| 9 Explorative Fallstudie zur Modellierung von Entwicklungsprojekten   |           | X           | X         |              |
| 10 Illustratives Beispiel LEGO Bagger   |           |             | X         | X            |
| 11 Fallstudie TUfast  |           |             | X         | X            |
| 12 Fallstudie Anlagenbau  |           |             | X         | X            |

RC: Eingrenzung des Forschungsfelds (engl. *Research Clarification*); DS I: Deskriptive Studie I;  
PS: Präskriptive Studie; DS II: Deskriptive Studie II

Nach der DRM wird zunächst das Forschungsfeld in der sogenannten „**Research Clarification**“ für eine bestimmte Problemstellung eingegrenzt. Das initiale Forschungsfeld dieser Arbeit war durch das Arbeitsprogramm im Teilprojekt B1 „Zyklusorientierte Planung und Koordination von Entwicklungsprozessen“ im Sonderforschungsbereich 768 gegeben, das der Autor als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München bearbeitete. In diesem Kontext durchgeführte **Experteninterviews** (1), **explorative Literaturrecherchen** (2) und Gespräche mit Forschungskolleginnen und -kollegen ermöglichten eine schrittweise Eingrenzung des Forschungsfelds von allgemeinen Herausforderungen der Prozessmodellierung, über fehlendes Verständnis bezüglich Abhängigkeiten im Prozess, bis hin zur fehlenden Unterstützung für das Management dieser Abhängigkeiten in komplexen Projekten. Außerdem schufen die Recherchen ein ausgeprägtes Verständnis über relevante theoretische Grundlagen (Betrachtungskontext, Methoden).

Im Rahmen einer **ersten deskriptiven Studie** wurden weitere **explorative, teils spezifischere Literaturrecherchen** (4, 6, 8) durchgeführt, die die Basis für den erarbeiteten Stand der Forschung und Technik bilden. Zusätzlich können **explorative Untersuchungen** im Rahmen des Forschungsprojekts „Anforderungs- und Änderungsmanagement in der Topdown Entwicklung mechatronischer Produkte (A<sup>2</sup>TEMP)“<sup>4</sup> (3) und in **zwei weiteren Fallstudien** mit Industriepartnern (5, 9) der DRM-Kategorie „Deskriptive Studie I“ zugeordnet werden. Die Ergebnisse flossen einerseits in die weitere Problemdefinition ein. Andererseits bilden sie die Grundlage für Anforderungen an den Lösungsansatz und stellen als Wissensbasis selbst einen Teil des Lösungsansatzes dar. Die erarbeiteten Erkenntnisse tragen insbesondere zur Beantwortung der Forschungsfragen FF1 und FF4 bei.

Die schrittweise Entwicklung des Ansatzes zur strukturbasierten Koordinationsplanung (mit Bezug auf die Forschungsfragen FF2 und FF3) als **präskriptive Studie** erfolgte zunächst im Rahmen einer **industriellen Fallstudie** über die Modellierung von Entwicklungsprojekten (9). Darüber hinaus wurden (basierend auf den Erkenntnissen der deskriptiven Studie I) theoriebildende Ergebnisbausteine bezüglich Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten (Arten, Charakteristika, Messgrößen) und Herausforderungen der Koordination erarbeitet (Forschungsmaßnahmen 5, 6 und 8). In Form von Aktionsforschung [Blessing & Chakrabarti 2009, S. 193] wurde der Ansatz anhand eines **illustrativen Beispiels** (10) und in **zwei weiteren Fallstudien** mit einem studentischen Entwicklungsprojekt (11) und einem Industriepartner (12) weiterentwickelt und initial evaluiert. Das akademische Beispiel diente insbesondere zur Unterstützungsevaluation des entwickelten Ansatzes, die Blessing & Chakrabarti [2009, S. 176-177] zur präskriptiven Studie zählen.

Als Teil der **zweiten deskriptiven Studie** werden schließlich die Anwendbarkeit (Anwendungsevaluation) und der Nutzen des Ansatzes (Erfolgsevaluation) bewertet [Blessing & Chakrabarti 2009, S. 181]. Zur Anwendungsevaluation dienen sowohl das illustrative Beispiel (10) als auch die Fallstudien 11 und 12. Im Rahmen der beiden Fallstudien wurde außerdem auf eine Erfolgsbewertung abgezielt. Darüber hinaus wurde anhand eines **Experiments** (7) der Nutzen eines erweiterten Verständnisses durch die Charakterisierung von Abhängigkeiten bewertet.

---

<sup>4</sup> Forschungsprojekt gefördert durch die KME Kompetenzzentrum Mittelstand GmbH und in Kooperation mit mehreren Mitgliedsunternehmen des bayme vbm.

## Anmerkungen zur konkreten Vorgehensweise

In den Literaturrecherchen wurde auf Online-Datenbanken sowie auf den Bestand der Bibliotheken der Technischen Universität München (TUM) und des Massachusetts Institute of Technology (MIT) zurückgegriffen. Die Suche erfolgte vorwiegend über Google Scholar, Web of Knowledge und Scopus. Die Suchbegriffe wurden systematisch durch die Verwendung relevanter Synonyme und verwandter Begriffe variiert. Zahlreiche Publikationen wurden außerdem mittels Vorwärts- und Rückwärtssuche basierend auf relevanten Quellen identifiziert. Weitere Details zum konkreten forschungsmethodischen Vorgehen werden an den entsprechenden Stellen im Hauptteil erläutert. Das übergeordnete Forschungsvorgehen wird im nachfolgenden Kapitel nochmals in den Aufbau der Arbeit eingeordnet (vgl. Abbildung 1-3).

## 1.5 Aufbau der Arbeit

Der grundlegende Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1-3 dargestellt. Als erstes werden in **Kapitel 2** theoretische Grundlagen zur Bildung eines gemeinsamen Grund- und Begriffsverständnisses für diese Arbeit vermittelt. Die vorliegende Arbeit versteht sich dabei im Kontext der integrierten Produktentwicklung bzw. des Systems Engineering, in dem die Koordination durch das Prozess- und Projektmanagement unterstützt wird. Weiterhin werden methodische Grundlagen über Systemmodellierung und das strukturelle Komplexitätsmanagement erläutert, die für die Betrachtungen in dieser Arbeit relevant sind.

**Kapitel 3** bildet den Stand der Technik ab und liefert einen Überblick über relevante Vorarbeiten in Bezug auf Koordination in Entwicklungsprojekten. Dafür werden zunächst Modellierungsansätze und Modelle diskutiert, die zur Unterstützung der Koordinationsplanung verwendet werden können. Anschließend werden identifizierte Publikationen rund um den Umgang mit Abhängigkeiten erläutert. Weiterhin werden bereits existierende Ansätze beleuchtet, die Zusammenhänge in Entwicklungsprojekten hinsichtlich der Koordination analysieren. Nachdem bestehende Möglichkeiten zur Nutzung vorhandener Daten aufgezeigt werden, schließt das Kapitel mit einer Zusammenfassung des weiteren Forschungsbedarfs.

In **Kapitel 4** werden Erkenntnisse zusammengefasst, die auf Basis von Literaturrecherchen und Beobachtungen in der Praxis gesammelt wurden. Die Beschreibungen sollen ein erweitertes Verständnis über Abhängigkeiten und Koordination bilden. Dafür werden unterschiedliche Arten von Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten, Charakteristika und Messgrößen zur Beschreibung von Abhängigkeiten, sowie unterschiedliche Herausforderungen der Koordination aufgezeigt.

Der erarbeitete Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung wird in **Kapitel 5** beschrieben. Zunächst werden Anforderungen an die Unterstützung formuliert und ein Basis-Metamodell vorgestellt, das als Ausgangspunkt für den Ansatz dient. Das Vorgehen wird anhand eines illustrativen Beispiels Schritt für Schritt erläutert. Neben einer ersten Diskussion des Ansatzes werden schließlich potentielle Erweiterungen des Ansatzes aufgezeigt.

Die Evaluation des Ansatzes wird in **Kapitel 6** beschrieben. Dafür wird zunächst das Evaluationsdesign vorgestellt und dann die Ergebnisse aus zwei Fallstudien sowie aus einer Fragebogenstudie präsentiert. Die Evaluation schließt mit einer Reflexion und einem Gesamtfazit.

In **Kapitel 7** werden schließlich der Inhalt der Arbeit zusammengefasst, Implikationen für Forschung und Industrie herausgearbeitet und ein Ausblick auf weiterführende Forschungsrichtungen gegeben.

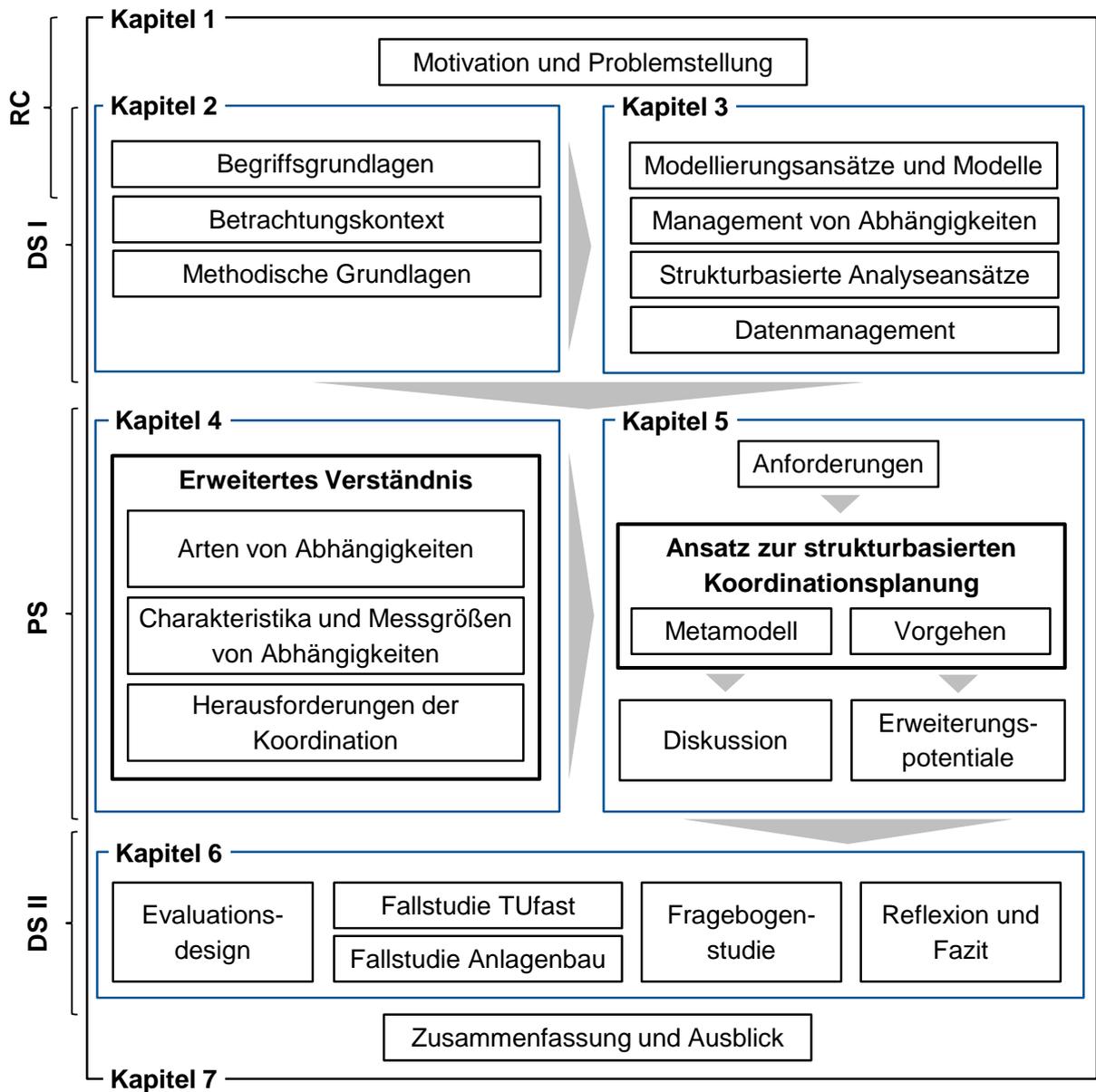


Abbildung 1-3 Illustration des Aufbaus der Arbeit.



## 2. Theoretische Grundlagen

*Dieses Kapitel vermittelt theoretische Grundlagen zu relevanten Themenbereichen, die das Verständnis der Ausführungen in dieser Arbeit fördern sollen. Dafür werden zunächst grundlegende Begriffe definiert. Anschließend wird zur integrierten Produktentwicklung und zum Systems Engineering sowie auf Grundlagen des Prozess- und Projektmanagements Bezug genommen, um den Betrachtungskontext zu beleuchten. Daran anknüpfend werden methodische Grundlagen der Systemmodellierung und des strukturellen Komplexitätsmanagements erläutert, auf denen die weiteren Betrachtungen in der Arbeit aufbauen.*

### 2.1 Grundlegende Begriffe

#### 2.1.1 Systemsicht auf Entwicklungsprojekte

Das Systemdenken ist „eine besondere Sicht auf die Wirklichkeit [...], die unsere Sinne für die Wahrnehmung des Ganzen und die Wechselwirkungen zwischen deren Bestandteilen schärft“ [Schulze 2016, S. 154]. Es kann dabei zwischen realen Systemen und Systemkonzepten als eine gemeinsame mentale Repräsentation eines geplanten Systems unterschieden werden [Walden *et al.* 2015, S. 5]. Die Definition eines Systems lässt sich nach INCOSE [Walden *et al.* 2015, S. 5] und [ISO/IEC/IEEE 2015] folgendermaßen zusammenfassen (freie Übersetzung und Zusammenfassung des Autors aus dem Englischen):

*Ein System ist eine Kombination interagierender Elemente oder Subsysteme, das definierte Zwecke/Ziele erfüllt. Zu den Elementen zählen Produkte (Hardware, Software, Firmware), Prozesse, Personen, Information, Techniken, Einrichtungen, Dienstleistungen und weitere unterstützende Elemente.*

Während die Systemdefinition nach INCOSE lediglich auf die in der Produktentwicklung zu entwickelnden Systeme (Produktsystem in Abbildung 2-1) abzielt, soll das Systemverständnis in dieser Arbeit erweitert gelten. In Anlehnung an Browning *et al.* [2006]<sup>5</sup> wird ein Entwicklungsprojekt als ein System bestehend aus fünf Teilsystemen betrachtet (Abbildung 2-1). Das Organisationssystem repräsentiert die handelnden Akteure, die mit Hilfe von Werkzeugen und Tools (Toolsystem) in unterschiedlichen Prozessen (Prozesssystem) ein Produkt (Produktsystem) entwickeln. Diese Systeme sind in einem Zielsystem eingebettet.

---

<sup>5</sup> Die Unterscheidung der fünf Projektsysteme basiert ursprünglich auf den Beschreibungen der Systemtechnik nach Ropohl [1975] und auf dem sogenannten ZOPH-Modell nach Negele *et al.* [1997].

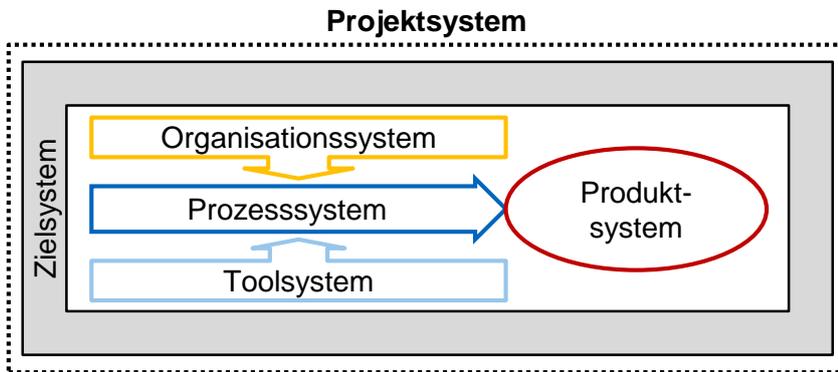


Abbildung 2-1 Die fünf Teilsysteme eines Projekts in Anlehnung an Browning et al. [2006].

Hinsichtlich des Ansatzes zur strukturbasierten Koordinationsplanung liegt der Fokus in dieser Arbeit insbesondere auf einer integrierten Betrachtung des Produkt-, Prozess- und Organisationssystems. Das Zielsystem und das Toolsystem sind in Entwicklungsprojekten häufig nicht explizit modelliert, weshalb davon ausgegangen wird, dass entsprechende Daten nicht für eine rechnerbasierten Unterstützung zur Verfügung stehen. Einzelne Aspekte fließen jedoch indirekt über eines der drei anderen Teilsysteme mit ein (z. B. Anforderungen als Teil des Produktsystems oder Methoden als Teil des Prozesssystems).

### 2.1.2 Systemstrukturen

Die Elemente und Relationen eines Systems bilden eine Systemstruktur, die gewisse Muster wie zum Beispiel eine Hierarchie, Sternstruktur, Netzwerkstruktur oder Strukturen mit Feedback aufweisen können [Haberfellner et al. 2012, S. 35]. Eine hierarchische **Systemstruktur** sollte als *formale Hierarchie* basierend auf Relationen zwischen Elementen eines Systems von der **Systemhierarchie** als *logische Hierarchie* basierend auf der Dekomposition von Systemen unterschieden werden [Göpfert 2009, S. 20]. Dieser Unterschied ist in Abbildung 2-2 illustriert. Beispielsweise stellt die formal-organisationstheoretische Hierarchie einer Abteilung auf personeller Ebene keine logische Systemhierarchie dar, weil eine Vorgesetzte bzw. ein Vorgesetzter eine untergeordnete Person nicht „beinhaltet“. Dagegen kann eine formalhierarchische Abteilungsstruktur einer logischen Hierarchie entsprechen. Trotzdem hätten dann die Beziehungen zwischen den Abteilungen als Teilsysteme unterschiedliche Bedeutung:

- **Logische Hierarchie** (=Dekomposition): Abteilung A beinhaltet Abteilung A1 und Abteilung A2;
- **Formale Hierarchie** (=Zusammenhang): Abteilung A z. B. kontrolliert Abteilung A1 und Abteilung A2.

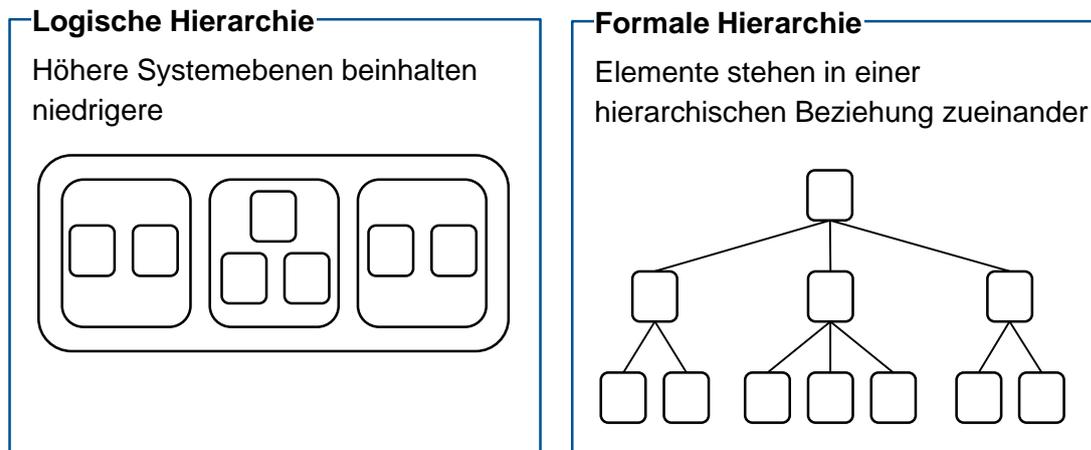


Abbildung 2-2 Logische Hierarchie vs. formale Hierarchie in Anlehnung an Göpfert [2009, S. 20, Abbildung 6].

Die **Systemarchitektur** ist letztlich durch die Systemstruktur und die Systemhierarchie eines Systems definiert [Göpfert 2009, S. 22-23]. Die Beziehungen einer Systemhierarchie werden auch vertikale Beziehungen genannt, die systemstrukturbildenden Beziehungen werden als horizontale Beziehungen bezeichnet [Göpfert 2009, S. 21]. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-3 verdeutlicht.

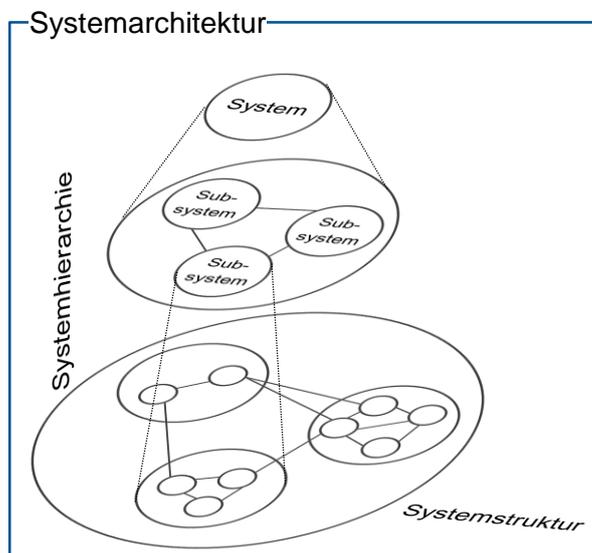


Abbildung 2-3 Systemarchitektur, definiert über horizontale Beziehungsstruktur und vertikale Hierarchiestruktur eines Systems in Anlehnung an Göpfert [2009, S. 23, Abbildung 8]; dargestellt als 3D-Systemmodell.

Die Unterscheidung von Systemstruktur und Systemhierarchie spielt in dieser Arbeit bei der informationstechnischen Umsetzung der Modellierung von Projektsystemen eine Rolle. Im Folgenden fließt die logische Hierarchie eines Systems jedoch auch stets in die strukturellen

Betrachtungen mit ein, weil die Zugehörigkeit von Subelementen zu einem übergeordneten Element auch als eine strukturelle Beziehung zwischen den jeweiligen Subelementen interpretiert werden kann.

### 2.1.3 Komplexität in Entwicklungsprojekten

Komplexität ist ein weitläufig verwendeter Begriff. Definitionen des Begriffs überschneiden sich in der Regel darin, dass ein komplexes System durch eine hohe Anzahl und eine große Vielfalt von sowohl Elementen als auch Relationen charakterisiert werden kann [Ehrlenspiel & Meerkamm 2013; Göpfert 2009, S. 44-45; Lindemann *et al.* 2009, S. 29; Schoeneberg 2014, S. 14]. Dies sind die Charakteristika, die auch für den Komplexitätsbegriff in dieser Arbeit ausschlaggebend sein sollen. Marle & Vidal [2016, S. 76] stellen ein umfangreiches, literaturbasiertes Framework zur Kategorisierung von Komplexitätsfaktoren insbesondere in Bezug auf Projekte vor. Es soll als Basis für vorausschauende, diagnostische oder retrospektive Analysen der zu erwartenden bzw. der vorhandenen Komplexität in Projekten dienen. Wesentliche Kriterien betreffen auch darin die Größe und Varietät des Projektsystems (Anzahl und Vielfalt der Elemente) und die Abhängigkeiten innerhalb des Projektsystems (Anzahl und Vielfalt der Relationen).

Zusätzlich zu den quantitativen Aspekten von Komplexität muss unterschieden werden, wie diese wahrgenommen werden. Ab wie vielen Elementen und Relationen gilt ein System als „komplex“? Komplexität lässt sich also nicht nur als objektive bzw. deskriptive Charakteristik eines Systems verstehen, sondern stellt auch ein subjektiv wahrgenommenes Phänomen eines Systembetrachters dar [Göpfert 2009, S. 46-48; Lindemann *et al.* 2009, S. 29]. In dieser Arbeit wird vorausgesetzt, dass die hier adressierten Entwicklungsprojekte vom jeweiligen Betrachter als komplex wahrgenommen werden.

### 2.1.4 Koordination und Koordinationsplanung

Im Gabler Wirtschaftslexikon wird Koordination als „Abstimmung von Teilaktivitäten in Hinblick auf ein übergeordnetes Ziel“ beschrieben [Gabler 2016]. Malone & Crowston [1994, S. 94] definieren Koordination etwas allgemeiner als das **Management von Abhängigkeiten** zwischen Aktivitäten. Auch Moser *et al.* [2015] bezeichnen Koordination als das Management von Abhängigkeiten. Dieses beinhaltet die Identifikation von Koordinationsbedarfen auf Basis von Abhängigkeiten und die daraus resultierende, notwendige Interaktion zwischen Akteuren (z. B. Information austauschen oder Vereinbarungen treffen). Demnach besteht dann Anlass zur Koordination, wenn es Abhängigkeiten zwischen arbeitsteiligen Handlungen von organisatorischen Einheiten gibt. Die Koordination beschränkt sich folglich nicht nur auf die Prozessebene (Abstimmung von Aktivitäten aufeinander), sondern bezieht sich insbesondere auch auf die Organisation (Abstimmung von Akteuren aufeinander). Im Gabler Wirtschaftslexikon werden schließlich die Aufgaben der Koordination wie folgt angegeben [Gabler 2016]:

- Lösung von Verteilungskonflikten (z. B. bei rivalen Ressourcen);

- Gestaltung der Arbeitsabläufe so, dass Doppelarbeit vermieden wird und sich eine optimale Reihenfolge realisieren lässt;
- Ausrichtung der Arbeit auf übergeordnete Ziele;
- Ausgleich von Wissens- und Wahrnehmungsunterschieden unter den Organisationsmitgliedern.

In der Sammlung weiterer Definitionen des Begriffs von Alexander [1993, S. 330] findet sich ein zusätzlicher Aspekt von Koordination: Es handele sich dabei um eine bewusste Intervention zur Definition von Maßnahmen, die die gegenseitige Abstimmung unterstützen. Eine solche Abstimmung aufgrund von Abhängigkeiten äußert sich in Entwicklungsprojekten schließlich in Form von Kommunikation und Zusammenarbeit.

Es sei darauf hingewiesen, dass im allgemeinen Sprachgebrauch hin und wieder nur die Interaktion bzw. die stattfindende Abstimmung als Koordination bezeichnet wird. Die Interpretation des Begriffs unterscheidet sich dabei je nach Betrachtungsperspektive. Eine Projektmanagerin bzw. ein Projektmanager koordiniert zum Beispiel zwei Teammitglieder, indem diese zu einer gemeinsamen Besprechung eingeladen werden (Koordination). Innerhalb der Besprechung koordinieren sich dann die beiden Teammitglieder (Interaktion, Abstimmung). Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Begriffe Koordination und Abstimmung wie folgt unterschieden werden:

*Der Begriff **Abstimmung** bezeichnet die Interaktion in Form von Kommunikation und Zusammenarbeit, die aufgrund von Abhängigkeiten im Entwicklungsprojekt notwendig ist. Die **Koordination** stellt eine Intervention dar, um einerseits dafür zu sorgen, dass überhaupt eine Abstimmung stattfindet und um andererseits eine erfolgreiche Abstimmung zu unterstützen.*

Im industriellen Kontext und in einigen Publikationen wird neben Koordination auch der Begriff **Synchronisation**<sup>6</sup> verwendet (z. B. Negele *et al.* [2006]). Mit Synchronisation ist in der Regel Koordination auf übergeordneter Ebene gemeint, das heißt nicht nur die Moderation der Abstimmung zweier abhängiger Entitäten, sondern auch die Schaffung begünstigter Rahmenbedingungen für die Abstimmung [Chucholowski *et al.* 2016b, S. 1465]. Im Englischen wird der zweite Aspekt auch als **Alignment** bezeichnet. Da es dafür im Deutschen keinen Begriff als treffende Übersetzung gibt, wird dieser Begriff im Folgenden als Anglizismus weiter verwendet.

Diese Arbeit zielt auf die Unterstützung der **Koordinationsplanung** ab, die als Teilaspekt der Synchronisation verstanden werden soll. Die Koordinationsplanung adressiert die systematische Identifikation von Koordinationsbedarfen, die Planung von Maßnahmen zur Koordination und die Schaffung günstiger Rahmenbedingungen für eine effektive und effiziente Abstimmung (*Alignment*).

---

<sup>6</sup> Synonym zu Synchronisation wird in der englischsprachigen Prozessliteratur auch der Begriff *process integration* verwendet.

## 2.2 Integrierte Produktentwicklung und Systems Engineering

Der Begriff *Integrierte Produktentwicklung* steht für die „zielorientierte Kombination organisatorischer, methodischer und technischer Maßnahmen/Hilfsmittel“, die von „ganzheitlich denkenden Produktentwicklern“ genutzt werden [Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 194]. Sie zielt darauf ab, das Zusammenspiel aller produktbeeinflussenden Stellen (z. B. Kunde, Vertrieb, Produktion, Materialwirtschaft, Controlling, Zulieferer) und eine integrierende Denkweise zu unterstützen, wodurch der gesamte Lebenslauf eines Produkts in der Entwicklung berücksichtigt werden soll. Das zu entwickelnde Produkt wird darin im Allgemeinen als technisches System im Sinne der Systemtechnik (vgl. Ropohl [1975]) verstanden [Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 19]. Das systemorientierte Denken hilft dabei, komplexe Systeme besser zu verstehen und zu gestalten, indem Wirkzusammenhänge durch die Verwendung von Modellen und weiteren Strukturierungshilfen berücksichtigt werden [Lindemann 2009, S. 15].

Auf dem Systemdenken baut auch das sogenannte Systems Engineering auf, das im Wesentlichen das gleiche Grundprinzip wie die integrierte Produktentwicklung beschreibt. Blanchard & Blyler [2016, S. 19-20] beschreiben es generell als „good engineering“ und fassen die grundlegenden Prinzipien des Systems Engineering wie folgt zusammen:

- Im Sinne eines **Top-down Ansatzes** wird das zu entwickelnde System als Ganzes betrachtet.
- Die Betrachtung des **gesamten Lebenszyklus** ermöglicht die Berücksichtigung aller Anforderungen und Einflüsse aus Entwicklung, Produktion, Vertrieb, Nutzung, Wartung und Service, sowie Entsorgung.
- Insgesamt wird auf die **umfassende Identifikation von Systemanforderungen** sowie deren Zusammenhang bzw. ihr Bezug auf übergeordnete Ziele besonderer Wert gelegt.
- Die Entwicklung erfordert **interdisziplinäre Zusammenarbeit**.
- Die **Beherrschung von Schnittstellen** spielt eine entscheidende Rolle, um Probleme aufzudecken und um die Güte der Systementwicklung und -integration zu überwachen.

Im Systems Engineering steht zunächst das Produkt als technisches System im Vordergrund, wobei Methoden und Prozesse zur Realisierung der oben genannten Grundprinzipien bereitgestellt werden. INCOSE (International Council on Systems Engineering) hat dafür vier Prozessgruppen erarbeitet und in einer Norm definiert, die der Systems Engineering Praxis einen Rahmen geben [ISO/IEC/IEEE 2015; Walden *et al.* 2015]: Technische Prozesse; Technische Management Prozesse; Organisatorische Projekt-Unterstützungsprozesse und Vertragsprozesse. Die tatsächlichen Entwicklungsaktivitäten gehören zu den technischen Prozessen. Die Technischen Management Prozesse beinhalten dagegen klassische Aufgaben des Projektmanagements. So wird in der Regel auch die Rolle der Systemingenieurin bzw. des Systemingenieurs von einer Projektmanagerin bzw. einem Projektmanager unterschieden. Systemingenieurinnen und -ingenieure verantworten insbesondere die technischen Projektziele als Teil der Systemgestaltung (d. h. Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt) und das Projektmanagement verantwortet die geschäftlichen Ziele (d. h. Termine, Budget, Ressourcen) durch die Projektplanung und -kontrolle [Forsberg *et al.* 2005, S. 7; Haberfellner *et al.* 2012; Schulze 2016, S. 168].

Die Produktentwicklung im Kontext dieser Arbeit betrifft folglich nicht nur das zu entwickelnde Produkt als technisches System, sondern auch die Organisation der Zusammenarbeit durch die Planung von Verantwortlichkeiten (Aufbauorganisation) und der Prozesse (Ablauforganisation) [Lindemann 2009, S. 8]. Die **Aufbauorganisation** beinhaltet die Gliederung der Unternehmung in Abteilungen oder Teams und die Zuordnung von Aufgaben zu diesen. Die **Ablauforganisation** befasst sich „mit der Durchführung dieser Aufgaben sowie der Koordination der zeitlichen und räumlichen Aspekte der Aufgabenausführung“ [Becker & Kahn 2005, S. 6]. Um den Kontext der Betrachtungen in dieser Arbeit genauer zu skizzieren, werden im Folgenden Grundlagen über die Entwicklungsorganisation, die verteilte Entwicklung, den Entwicklungsprozess, Concurrent Engineering und den Aufbau mechatronischer Produkte zusammengefasst.

### 2.2.1 Die Entwicklungsorganisation

Die Aufbauorganisation eines Unternehmens beschreibt die Gliederung der Organisationseinheiten und regelt deren Beziehungen untereinander (z. B. Verantwortung, Kompetenz, Kommunikation) [Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 172]. Die Entwicklungsorganisation kann generell funktional oder divisional gegliedert werden [Ehrlenspiel & Meerkamm 2013, S. 172-173; Schertler 2009]. In der Regel findet man in der Praxis eine Mischform solcher Einliniensysteme (d. h. jede Stelle hat nur eine übergeordnete Stelle). So erfolgt die weitere Unterteilung einzelner Sparten in einer divisionalen Organisation häufig funktional. Alternativ werden in Matrixorganisationen mehrere Organisationsprinzipien gleichzeitig in einem Mehrliniensystem (d. h. eine Stelle hat mehrere übergeordnete Stellen) angewendet [Schulte-Zurhausen 2002].

Eine Gliederung nach konkreten **Entwicklungsprojekten** ist ein für diese Arbeit besonders relevanter Spezialfall einer divisionalen Aufteilung. In PMI [2013, S. 21-25] wird ein Überblick über unterschiedliche Eingliederungsmöglichkeiten von Projekten in die Organisationsstruktur gegeben. Folgende Stereotype werden unterschieden:

- **Rein funktionale Organisation:** Die Projektarbeit findet in jeder Abteilung unabhängig voneinander statt, die notwendige Projektkoordination findet auf Ebene der Abteilungsleiterinnen und -leiter statt.
- **Schwache Matrixorganisation:** Die Weisungsbefugnis bleibt bei den Vorgesetzten in der Linie, Projektmanager unterstützen koordinierend und überwachen Termine.
- **Ausbalancierte Matrixorganisation:** Projektmanagerinnen und -manager haben eine eingeschränkte Entscheidungsgewalt und berichten dem übergeordneten funktionalen Management.
- **Starke Matrixorganisation:** Vollzeit Projektmanagerinnen und -manager besitzen nennenswerte Autorität und unterstützendes Personal zur Projektadministration.
- **Reine Projektorganisation:** Projektmanagerinnen und -manager haben volle Autorität und Entscheidungsspielraum. Die gesamte Organisation arbeitet überwiegend projektorientiert und Teammitglieder sind örtlich zusammengefasst.

Die Gliederung der Organisation in Organisationseinheiten liefert bereits einen Beitrag zur Koordination. Durch die Zusammenfassung von Personengruppen, die in der Regel eng zusammenarbeiten und viel kommunizieren, wird deren Abstimmung untereinander begünstigt. Konkrete Abstimmungsbedarfe in einzelnen Entwicklungsprojekte bleiben dabei jedoch meistens unberücksichtigt, weil die übergeordnete Organisationsstruktur nicht für jedes Projekt spezifisch angepasst wird.

### **Arbeitsteilung und verteilte Entwicklung**

Bei der Entwicklung von komplexen, mechatronischen Produkten ist ein hoher Grad von Arbeitsteilung notwendig [Lindemann *et al.* 2009, S. 4]. Die Arbeitsteilung ist einerseits ein Mittel zur Reduktion der Komplexität der Entwicklungsaufgabe, führt jedoch durch die Zunahme der Schnittstellen der aufgeteilten Einheiten wiederum zu einer inneren Komplexität [Schuh & Günther 2005, S. 7] und damit zu einer Zunahme des Koordinationsbedarfs [Kern 2016, S. 470].

Die Arbeitsteilung findet heutzutage häufig über Unternehmensgrenzen hinweg statt, was als verteilte Produktentwicklung bezeichnet wird [Kern 2016, S. 456]. Typische Entwicklungspartner sind Zulieferer, Ingenieursdienstleister, Forschungseinrichtungen, Kunden oder sogar Wettbewerber [Kern 2016, S. 455]. Ein wesentlicher Aspekt der verteilten Produktentwicklung ist dabei die räumliche Trennung der beteiligten Personen. Diese Trennung führt zu einer Verlangsamung der Teamprozesse [Hauptman & Hirji 1999, S. 184; Kern 2016, S. 468] und verschlechtert nachweislich die Koordination [Espinosa *et al.* 2007, S. 142-152]. Gierhardt [2002, S. 73] listet Probleme in der verteilten Produktentwicklung auf und beschreibt ein Vorgehensmodell, das diese Probleme gezielt mit den Bausteinen Coaching, Prozess- und Projektmanagement, Informationslogistik, Teamentwicklung, Systementwicklung und Lessons Learned adressiert [Gierhardt 2002, S. 158]. Das Vorgehen bietet ein Rahmenwerk zur Planung der Kooperation zwischen Entwicklungspartnern, wobei die Planung der operativen Zusammenarbeit insbesondere als Teil des Bausteins Prozess- und Projektmanagement betrachtet wird. Darin wird vorgeschlagen, gemeinsame Ziele, Kooperationsaktionen, Austauschobjekte, Verantwortliche und eine gemeinsame Organisationsstruktur zu definieren. Konkrete methodische Unterstützung zur Ermittlung von Kooperationsaktionen, Austauschobjekten, Verantwortlichen und der Organisationsstruktur fehlen jedoch weiterhin.

### **2.2.2 Der Entwicklungsprozess**

Der Produktentwicklungsprozess verkörpert die grundlegende Ablauforganisation einer Entwicklung. Er kann als Teil des Produktentstehungsprozesses gesehen werden, in dem die Eingangsgröße *Anforderungen* in die Ausgangsgröße *vollständiges Produktmodell* bzw. *Prototyp* transformiert wird [Bender & Gericke 2016, S. 401]. Ein Großteil der in der Literatur auffindbaren Entwicklungsprozessbeschreibungen spiegelt eine gewisse Entwicklungsmethodik bzw. das methodische Vorgehen in der Entwicklung wider. Zu den bekanntesten Vertretern gehören das Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [VDI 1993] oder das V-Modell [VDI 2004; Walden *et al.* 2015] (vgl. Abbildung 2-4). Für eine ausführliche Gegenüberstellung existierender Entwicklungsmethodiken und entsprechend definierten Prozessen sei auf Gericke & Blessing [2012] verwiesen.

Parallel zu diesen – oft auch disziplinspezifisch beschriebenen – Vorgehensweisen können die ablaufenden Tätigkeiten als Problemlöseprozess gesehen werden [Bender & Gericke 2016, S. 409]. Häufig referenzierte Prozesse sind hier der ebenfalls in der VDI 2221 präsentierte „Systemtechnische Problemlösezyklus“ [VDI 1993, S. 4], der Vorgehenszyklus nach Ehrlenspiel & Meerkamm [2013, S. 90] oder elementare Denk- und Handlungsabläufe abbildende Modelle wie das TOTE-Schema (Test – Operate – Test – Exit nach Miller *et al.* [1973]) oder der PDCA-Zyklus (Plan – Do – Check – Act nach Deming [1989]) [Lindemann 2009, S. 38-41].

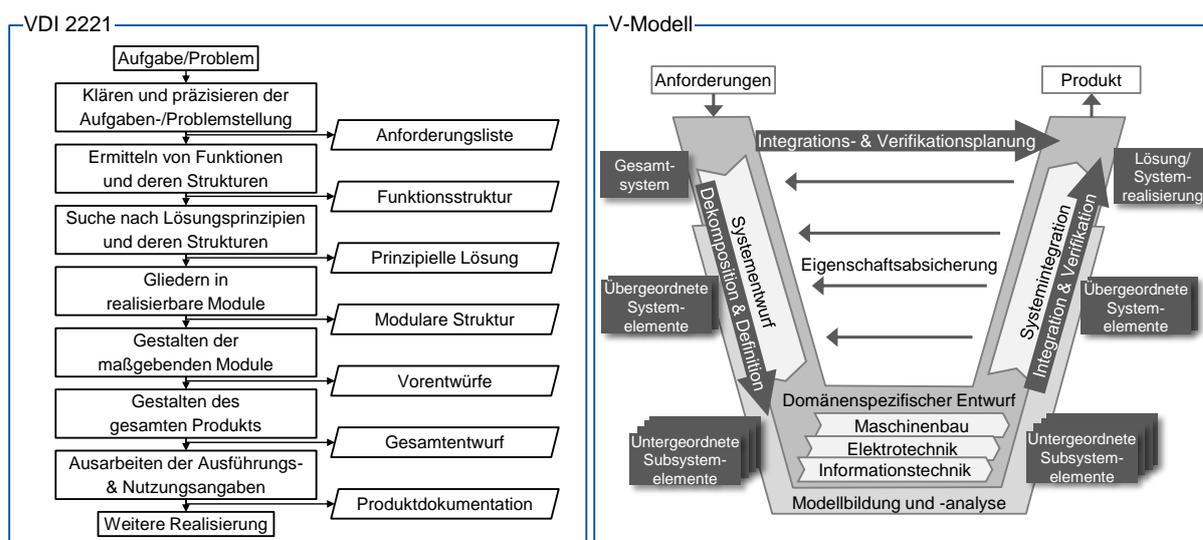


Abbildung 2-4 Links: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [VDI 1993, S. 9, Bild 3.3].

Rechts: V-Modell in Anlehnung an VDI 2206 [VDI 2004, S. 29, Bild 3-2] und Walden *et al.* [2015, S. 34, Figure 3.6].

An den oben beschriebenen Vorgehensmodellen lässt sich kritisieren, dass sie grundsätzlich einen sequentiellen Ablauf beschreiben, in dem zwar Iterationen vorgesehen sind, diese aber für unerfahrene Betrachter nur schwach hervorgehoben werden [Lindemann 2009, S. 47]. Dieser Argumentation folgend stellt Lindemann [2009, S. 46-54] das Münchner Vorgehensmodell (MVM) vor, das als Hilfsmittel zur Entwicklungsprozessplanung, als Orientierungshilfe zur Problemlösung innerhalb von Prozessen und zur Analyse bzw. Reflexion des Vorgehens dienen soll. Trotzdem stellt auch dieses Vorgehensmodell nur eine grobe Vorlage zur Planung der konkreten Entwicklungsabläufe dar.

Die Definition eines Prozesses mit einzelnen Prozessschritten und deren Reihenfolge auf Basis eines Vorgehensmodells trägt ebenso wie die Organisationsstruktur bereits zur Koordination bei, weil dadurch der Entwicklungsablauf auf übergeordneter Ebene geplant wird. Die Prozesse sind jedoch nicht detailliert genug, um die konkret stattfindende Abstimmung in der Entwicklungsarbeit zu koordinieren. Im Rahmen des Prozessmanagements definieren Unternehmen in der Regel detailliertere Prozesse, die schließlich durch das Projektmanagement für spezifische Projekte angepasst werden. Darauf wird in Kapitel 2.3 näher eingegangen.

## Concurrent Engineering

Das Concurrent Engineering ist ein etablierter Ansatz zur Verkürzung der Entwicklungszeiten und zur Integration mehrerer an der Entwicklung beteiligter Funktionsbereiche [Kreimeyer & Lindemann 2011, S. 8]. Es wird im deutschsprachigen Raum auch Simultaneous Engineering genannt [Eversheim *et al.* 1995]<sup>7</sup>. Der Ansatz zielt darauf ab, sequenziell stattfindende Aktivitäten aus unterschiedlichen Funktionsbereichen zu parallelisieren bzw. überlappen zu lassen und dabei nicht nur die Entwicklungszeit zu verkürzen, sondern auch die Entwicklungs- und Herstellkosten zu reduzieren und die Produktqualität zu verbessern [Eversheim *et al.* 1995, S. 2]. Die Parallelisierung der Arbeit erfordert letztlich interdisziplinäre Zusammenarbeit, wofür funktionsübergreifende Teams gebildet werden [Eversheim *et al.* 1995, S. 2].

Die gleichzeitige Durchführung von Aktivitäten steigert die Anzahl der Abhängigkeiten zwischen den Aktivitäten und somit die Komplexität [Kreimeyer & Lindemann 2011, S. 8]. Oft können dann nur vorläufige Ergebnisse bzw. Versionen zwischen Aktivitäten ausgetauscht werden, was diese Zwischenergebnisse wiederum zu abhängigen Objekten macht [Kreimeyer & Lindemann 2011, S. 8]. Die Parallelisierung der Entwicklungsaktivitäten führt so schließlich zu gesteigertem Koordinationsbedarf [Browning & Ramasesh 2007, S. 217], wobei die Koordination als eine der Hauptaufgaben der Projektmanagerinnen bzw. Projektmanager in Simultaneous Engineering Teams (d. h. funktionsübergreifenden Teams) gesehen wird [Eversheim *et al.* 1995, S. 112]. Außer dem Hinweis zur Bildung solcher Teams hält der Ansatz jedoch keine weitere Unterstützung zur Koordination bereit.

### 2.2.3 Struktur mechatronischer Systeme

In dieser Arbeit stehen Projekte zur Entwicklung mechatronischer Systeme im Vordergrund, weil insbesondere mechatronische Systeme für ihre Komplexität bekannt sind [Gausemeier & Moehring 2003, S. 1]. Hinsichtlich der Koordination der Entwicklungsarbeit ist es notwendig, den strukturellen Aufbau eines mechatronischen Produkts zu verstehen, weil die verschiedenen Umfänge üblicherweise von Personen bzw. Gruppen unterschiedlicher Fachdisziplinen parallel entwickelt werden. Abbildung 2-5 zeigt die Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach VDI 2206 [VDI 2004]. Das zentrale Element eines mechatronischen Systems bildet ein überwiegend mechanisch geprägtes Grundsystem, das pneumatische, hydraulische, elektronische, magnetische, thermische, optische oder weitere physikalische Bausteine enthalten kann. Sensoren und Aktoren koppeln dieses mit einem informationsverarbeitenden Teil. Die Sensoren geben Messgrößen aus dem Grundsystem in Form von elektrischen Führungsgrößen an Prozessoren weiter. Aktoren gewährleisten über Stellgrößen die Funktionalität des mechatronischen Systems [Czichos 2008, S. 29; Gehrke 2005, S. 10-11].

---

<sup>7</sup> Ursprünglich unterscheiden sich die beiden Ansätze insofern, dass Concurrent Engineering auf die Parallelisierung der Aktivitäten unterschiedlicher Funktionsbereiche innerhalb der Entwicklung abzielt und Simultaneous Engineering explizit die Parallelisierung der Aktivitäten der Produktplanung und Produktionsmittelplanung (siehe auch „Integrierte Produkt- und Prozessplanung“) adressiert [Bender & Gericke 2016, S. 404]. Heutzutage werden die Begriffe jedoch weitläufig synonym verwendet.

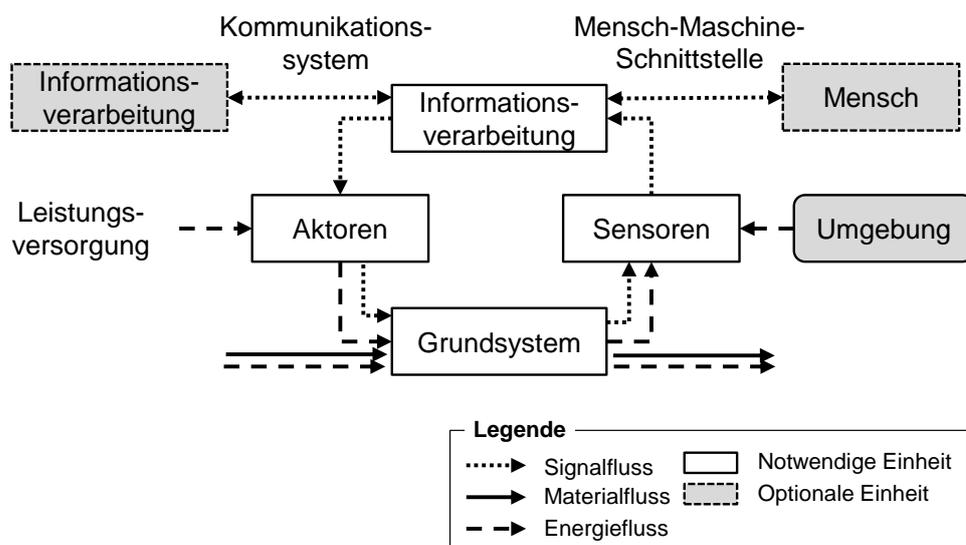


Abbildung 2-5 Grundstruktur eines mechatronischen Systems nach [VDI 2004, S. 14, Bild 2-2].

Im Allgemeinen können die strukturbildenden Zusammenhänge eines mechatronischen Systems auch als technische Schnittstellen bezeichnet werden. Durch die Zuordnung einzelner Teilsysteme zu unterschiedlichen Domänen wird die **Domänenstruktur** festgelegt [Jansen 2007, S. 9]. Veränderungen im Bereich der Sensor- oder Aktoranordnung und deren Aufteilung kann einen direkten Einfluss auf die Domänenstruktur haben [Jansen 2007, S. 14]. Dies wirkt sich schließlich auch auf die notwendige Abstimmung hinsichtlich der Schnittstellen im System aus.

Die Schnittstellen können funktionaler oder geometrischer Natur sein [Zohm 2004, S. 142]. Weiterhin kann eine Unterteilung in direkte und indirekte Schnittstellen vorgenommen werden. Direkte funktionale Schnittstellen ergeben sich aufgrund der kybernetischen Flüsse Energie, Material oder Information. Durch diese Flüsse können auch nicht direkt beteiligte Elemente beeinflusst werden, wodurch indirekte funktionale Schnittstellen entstehen. Direkte geometrische Schnittstellen finden sich an den Berührungspunkten von Elementen, während indirekte geometrische Schnittstellen durch die Anordnung der Elemente und dadurch bedingter Bauraumbegrenzungen entstehen (vgl. Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1 Klassifizierung von Schnittstellen nach Zohm [2004, S. 143].

|                 | <b>funktional</b>                                       | <b>geometrisch</b>          |
|-----------------|---|-----------------------------|
| <b>direkt</b>   | Kybernetische Flüsse: Energie, Material und Information | Verbindungen, Befestigungen |
| <b>indirekt</b> | Störfunktionen, Dissipationseffekte, Verlustgrößen      | Bauraumbegrenzungen         |

Die Hauptfunktion von Schnittstellen in mechatronischen Produkten kann als die Realisierung von Energie-, Material-, und Informationsflüssen gesehen werden [Breidert 2007, S. 37]. Zur genaueren Analyse **funktionaler Schnittstellen** können weitere Subkategorien der kybernetischen Flüsse unterschieden werden. Breidert [2007, S. 115] klassifiziert **Materialflüsse** zum Beispiel anhand der Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig und unterteilt **Energieflüsse** in mechanische, elektrische, magnetische, elektromagnetische, optische und thermische Flüsse. Ein **Signalfluss** stellt letztlich die physische Ausprägung eines Informationsflusses dar, wobei prinzipiell analoge und digitale Signale unterschieden werden können [Breidert 2007].

Elektrische/Elektronische und mechanische Komponenten werden räumlich integriert, um sie zu einer baulichen Einheit zusammenzufassen. Herausforderungen liegen dabei unter anderem in der Integration elektronischer/elektrischer Bauteile in das Einsatzumfeld der mechanischen Komponenten. Die räumliche Integration muss beispielsweise hohe Temperaturen, Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit, mechanische Stöße/ Schwingungen oder elektromagnetische Felder berücksichtigen [VDI 2004, S. 20]. **Geometrische Schnittstellen** können über Befestigungen oder Verbindungen realisiert werden. Laut Pahl *et al.* [2007, S. 582] dienen Verbindungen zur Übertragung von Kräften, Momenten und Bewegung zwischen Bauteilen bei eindeutiger und fester Lagezuordnung. Außerdem kann die Aufnahme von Relativbewegungen außerhalb der Belastungsrichtung, das Abdichten gegen Fluide und eine thermische und elektrische Isolation notwendig sein. Schließlich können verschiedene Schlussarten mechanischer Verbindungen unterschieden werden [Pahl *et al.* 2007, S. 581-589]: Stoffschluss, Formschluss oder Kraftschluss. Neben solcher **Kontaktbedingungen** in Form von Befestigungen oder Verbindungen können sich **geometrische Abhängigkeiten** aus Bauraumbegrenzungen, festgelegten Mindestabständen oder aus Maßketten ergeben. All diese Möglichkeiten geometrischer Zusammenhänge sollten bei der Untersuchung der Produktstruktur berücksichtigt werden.

Die zuvor genannten Schnittstellen lassen sich nicht direkt auf die **Zusammenhänge zwischen Software-Komponenten** übertragen. Biedermann [2014, S. 27] fasst zusammen, dass Software hinsichtlich der Artefaktstruktur und der Abhängigkeitsstruktur betrachtet werden kann. Die Artefaktstruktur beschreibt die Funktionalität und Entfaltung einer Software. Software-Komponenten (hier als Überbegriff für Komponenten, Packages oder Klassen, vgl. Biedermann [2014, S. 29]) sind dabei in der Regel nicht rein hierarchisch gegliedert sondern ineinander verschachtelt. Neben diesen Gliederungs-Relationen zwischen den Komponenten bildet sich eine Abhängigkeitsstruktur aus Assoziations-, Aggregations-, Kompositions-, Abhängigkeits-, Generalisierungs- und Realisierungsbeziehungen [Biedermann 2014, S. 30].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass an der Entwicklung eines mechatronischen Produkts diverse Disziplinen beteiligt sind. Die Entwicklungsarbeit muss hinsichtlich vielfältiger Schnittstellen und Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Produktumfängen abgestimmt werden. Eine Kenntnis der genauen Art der Schnittstelle gibt Aufschluss darüber, was im Laufe der Entwicklung diesbezüglich abgestimmt werden muss.

## 2.3 Koordination durch Prozess- und Projektmanagement

Das vorangegangene Kapitel zeigt, dass die integrierte Produktentwicklung mechatronischer Produkte aufgrund der Arbeitsteiligkeit und den unterschiedlichen beteiligten Disziplinen mit vielen Koordinationsbedarfen einhergeht. Die Definition einer Aufbauorganisation und einer Ablauforganisation stellt bereits ein Rahmenwerk für eine übergeordnete Koordination der Entwicklungsarbeit dar, kann jedoch keine projektspezifische Koordination für konkrete Abstimmungsbedarfe abdecken. Je nachdem, wie detailliert die allgemeingültigen Prozesse definiert werden können, muss das Projektmanagement projektspezifische Anpassungen vornehmen und die konkrete Entwicklungsarbeit koordinieren. Die im Folgenden zusammengefassten Grundlagen zeigen auf, wie die Koordination durch das Prozess- und Projektmanagement adressiert wird.

Ein **Prozess** ist als „inhaltlich abgeschlossene, zeitliche und sachlogische Folge von Aktivitäten, die zur Bearbeitung eines betriebswirtschaftlich relevanten Objektes notwendig sind“, definiert [Becker & Kahn 2005, S. 6]. In einem Prozess werden entsprechend Eingangsinformationen (Input) unter Nutzung von Information, Wissen und materiellen Ressourcen zu Ausgangsinformationen (Output) verarbeitet [Lindemann 2009, S. 16]. Prozesse innerhalb der Entwicklung unterscheiden sich dabei jedoch in der Regel von anderen Geschäftsprozessen wie zum Beispiel dem Einkaufsprozess oder Produktionsprozess. Sie sind größtenteils schlecht strukturierbar und entfalten sich erst in ihrem Verlauf, weil das Entwicklungsergebnis zu Beginn noch unklar ist und der Weg dorthin nicht deterministisch ist [Lindemann 2009, S. 17]. Außerdem treffen in Entwicklungsprozessen mehrere Disziplinen aufeinander und sie weisen einen höheren Parallelitätsgrad und schließlich mehr Abhängigkeiten zwischen Aktivitäten auf [Browning *et al.* 2006, S. 114].

Unter dem Begriff **Entwicklungsprozess** werden im Allgemeinen zwei Dinge verstanden: Einerseits das generische, übergeordnete Vorgehen, nach dem sich jede Entwicklung richtet (vgl. Kapitel 2.2.2) und andererseits die konkrete, projektspezifische Sammlung von Aktivitäten, die tatsächlich durchgeführt wird [O'Donovan *et al.* 2005, S. 61].

Ein **Projekt** ist allgemein als ein „zeitlich begrenztes Vorhaben, das auf die Erzeugung eines einzigartigen Produkts, Services oder Ergebnisses abzielt“, definiert [PMI 2013, S. 2, freie Übersetzung des Autors aus dem Englischen]. In Entwicklungsprojekten wird zur Erreichung des Ziels auf vordefinierte Prozesse oder Prozessbausteine (vgl. Demers [2000]) zurückgegriffen, um die Effizienz und Effektivität der Entwicklung zu erhöhen. Diese Prozesse werden also in einem Projekt instanziiert.

### 2.3.1 Prozessmanagement

Das **Prozessmanagement** beschäftigt sich mit der **Planung, Steuerung und Kontrolle** von „inner- und überbetrieblichen Prozessen“ und adressiert sowohl Kern- als auch Supportprozesse [Becker & Kahn 2005, S. 8]. Der Definition eines Prozesses folgend kann ein Prozess durch beinhaltete Aktivitäten detailliert werden. Dekomponierte Einheiten eines Prozesses werden in dieser Arbeit auch als Subprozess oder Prozessschritt bezeichnet.

Wie im Kapitel 2.3 einleitend beschrieben, müssen Entwicklungsprozesse differenziert von anderen Geschäftsprozessen betrachtet werden. Trotzdem können die Strategien und Aufgabenfelder des Prozessmanagements auch auf Entwicklungsprozesse übertragen werden, sofern die immer wieder kehrenden Aspekte einer Entwicklung betrachtet werden.

## Ziele und Strategien des Prozessmanagements

Zu den klassischen Zielstellungen im Prozessmanagement zählen einerseits die **Dokumentation** der Prozesse zur Erhöhung der Transparenz oder für eine Auditierung bzw. Zertifizierung und andererseits die **Verbesserung der Prozessperformance** bzgl. Durchlaufzeiten, Fehlerquote oder Ressourcenbedarfe [Drawehn *et al.* 2008, S. 9]. Schmelzer & Sesselmann [2008, S. 8] detaillieren diesbezüglich die Aufgabenfelder Prozessführung, Prozessorganisation, Prozesscontrolling und Prozessoptimierung (vgl. Abbildung 2-6, links). Mit Perspektive auf die Funktionalität von Werkzeugen zur Unterstützung des Prozessmanagements können die Aufgaben auch als Modellierung & Dokumentation, Analyse & Simulation und Monitoring & Automatisierung zusammengefasst werden [Drawehn *et al.* 2008, S. 9] (Abbildung 2-6, rechts).

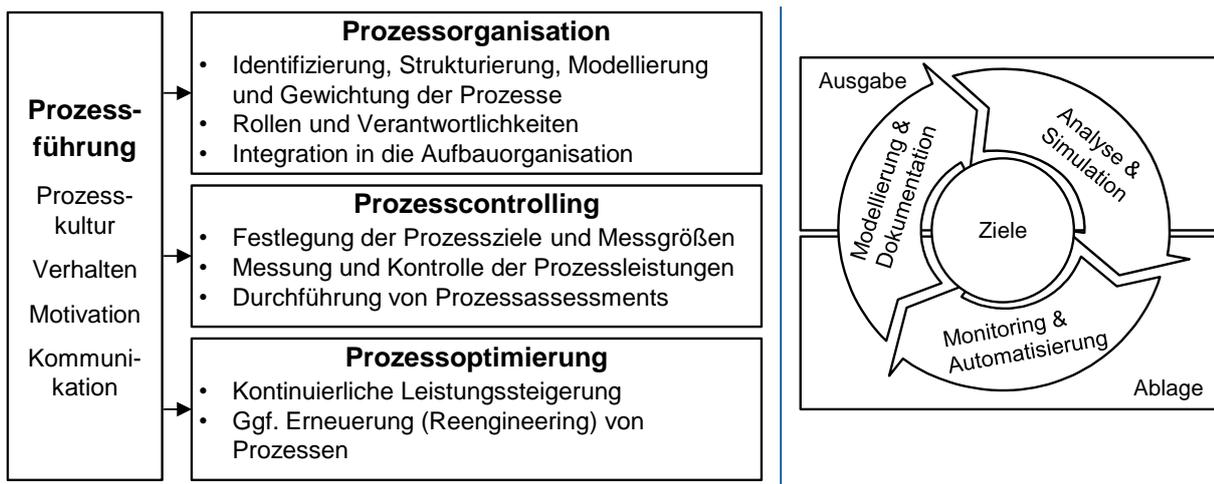


Abbildung 2-6 Aufgaben im Prozessmanagement. Links nach Schmelzer & Sesselmann [2008, S. 8, Abbildung 1-4], rechts nach Drawehn *et al.* [2008, S. 9, Abbildung 1].

## Prozessmodellierung als Basis des Prozessmanagements

Die Aufgabenbereiche deuten darauf hin, dass die Prozessmodellierung die Grundlage für Prozessmanagementmethoden bildet. Da es sich bei einem Prozess um ein nicht greifbares, immaterielles Phänomen handelt, kann er nur durch Modellierung handhabbar gemacht werden. Ist-Prozesse werden deskriptiv modelliert, um sie zu visualisieren, zu dokumentieren oder zu analysieren. Präskriptive Soll-Prozessmodelle dienen vor allem zur Planung eines (optimierten) Prozesses. Hier spielt ebenfalls die Visualisierung und Dokumentation in Form von Plänen bzw. **Referenzprozessen** eine Rolle [O'Donovan *et al.* 2005, S. 61]. Bestimmte Modellierungsmethoden ermöglichen eine rechnerbasierte Analyse oder Simulation eines Prozesses, um beispielsweise Durchlaufzeiten zu bestimmen oder kritische Prozessschritte zu

identifizieren. Auf gängige Prozessmodellierungsmethoden wird in Kapitel 3.1.3 weiter eingegangen.

### Prozessmanagement in der Praxis

In vielen Unternehmen sind Referenzprozessmodelle definiert, in denen generisch beschrieben ist, welche Aktivitäten oder Aufgaben in der Regel in einem Entwicklungsprojekt durchlaufen werden. Häufig sind auch die grundsätzlichen logischen Zusammenhänge der einzelnen Aktivitäten in einem Ablaufdiagramm beschrieben. Zum Beispiel trennen Meilensteine unterschiedliche Phasen als „Gate“ ab. Alle Aktivitäten vor dem Gate sollten abgeschlossen werden, bevor das Gate passiert wird und die Aktivitäten der darauffolgenden Phase starten können. Innerhalb einer Phase gilt zum Beispiel die Logik, dass zunächst ein CAD-Modell erstellt werden muss, bevor damit FEM-Simulationen durchgeführt werden können.

In ausgereifteren Prozessmodellen sind sogar Prozesszusammenhänge aufgrund von grundlegenden Schnittstellen innerhalb des zu entwickelnden Systems definiert, wodurch die Entwicklungsarbeit koordiniert wird. Wenn das System jedoch im Rahmen eines Entwicklungsprojekts weiterentwickelt wird, können sich diverse Schnittstellen ändern und Neue hinzukommen. Diese Schnittstellen können nicht im generischen Prozess vorgesehen werden. Ohnehin muss der generische Prozess für ein anstehendes Entwicklungsprojekt instanziiert werden, was auch *Prozesstailoring* genannt wird. Der so angepasste Prozess ist die Basis für die Projektplanung, die dem Projektmanagement zugeordnet wird.

### 2.3.2 Projektmanagement

Die **Planung** der konkreten Entwicklungsarbeit für ein Entwicklungsprojekt ist wesentlicher Bestandteil des Projektmanagements. Weitere Tätigkeiten des Projektmanagements adressieren die Initiierung, die Ausführung, die Überwachung und Steuerung (engl. *monitoring and controlling*) sowie den Projektabschluss [PMI 2013, S. 4]. Das Zusammenspiel dieser Aufgabenbereiche ist in Abbildung 2-7 veranschaulicht. Die Abbildung macht deutlich, dass die Projektplanung und die Projektausführung in einem kontinuierlichen Wechselspiel stehen. Die Überwachung und Steuerung ist ein stetiger, übergeordneter Prozess.

Nach den Lehren des Project Management Institute (PMI) werden diverse Projektpläne in einem integrierten Projektmanagementplan zusammengefasst, der die Basis für die komplette Projektarbeit darstellt [PMI 2013, S. 72]. O'Donovan *et al.* [2005, S. 67-69] fassen die in der Praxis häufig verwendeten Pläne als strategische Produktportfolio-Pläne, Stücklisten, Meilensteinpläne, Qualitätsmanagementpläne<sup>8</sup>, Aktivitätspläne und Personalpläne zusammen. In Bezug auf Koordination sind insbesondere die **Umfangsplanung** (betrachtet auch Portfolio-pläne und Stücklisten), die **Terminplanung** (Meilensteinpläne, Aktivitätspläne), die **Personalplanung** (Personalpläne) sowie die **Kommunikationsplanung** relevant. Sie werden im Folgenden in Anlehnung an PMI [2013] zusammenfassend erläutert.

---

<sup>8</sup> Hier ist das Qualitätsmanagement in Bezug auf Prozesse gemeint, d. h. Konformität mit z. B. ISO 9000 oder internen Qualitätsstandards.

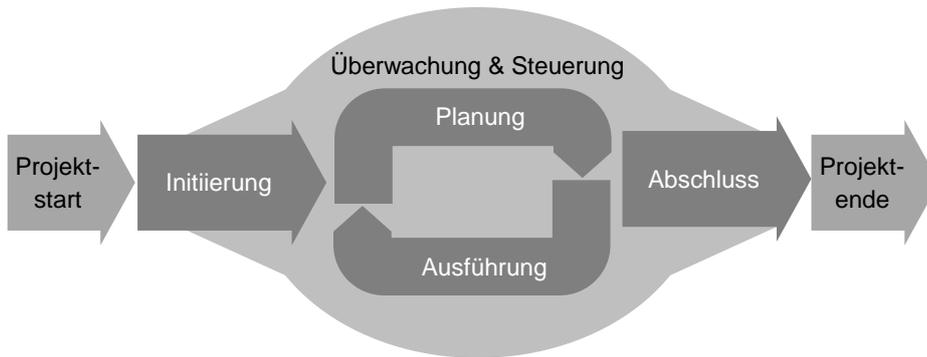


Abbildung 2-7 Projektmanagementtätigkeiten nach PMI [2013, S. 50, Figure 3-1].

Ausgangsbasis ist zunächst die Planung des Projektumfangs (engl. *project scope*), das heißt die Festlegung was im Rahmen des Projekts in Hinblick auf Ziele und Anforderungen erarbeitet wird. Ein wichtiges Resultat der Umfangsplanung ist der **Projektstrukturplan** (engl. *work breakdown structure (WBS)*), in dem der definierte Projektumfang (*Umfangs-Baseline*) in kleinere, handhabbare Teilergebnisse und entsprechende Arbeitspakete aufgeteilt wird. Im Rahmen des Projektzeitmanagements wird aufbauend auf der Umfangs-Baseline die Terminplanung durchgeführt. Dafür müssen zunächst alle notwendigen Aktivitäten und Abhängigkeiten zwischen diesen Aktivitäten identifiziert werden, der Ressourcen- und Zeitbedarf für die Aktivitäten abgeschätzt werden und ein **Projekt-Terminplan** (*Termin-Baseline*) entwickelt werden. Im Terminplan werden eine optimierte Reihenfolge, die Dauer und der Ressourceneinsatz unter Berücksichtigung zeitlicher Randbedingungen festgeschrieben. Für diese Terminplanung (engl. *scheduling*) werden Methoden und Tools (z. B. die Kritische-Pfad-Methode) verwendet, auf die in Kapitel 3.1.3 näher eingegangen wird. Aufgrund von Unsicherheiten vor allem zu Beginn eines Projekts, kann die Terminplanung für einen langen Zeithorizont in der Regel nur grob erfolgen. Zusätzlich zu Aktivitäten werden häufig auch **Meilensteine** als signifikante Zeitpunkte bzw. Ereignisse in einem Projekt definiert. Durch eine **kontinuierliche Planung** (engl. *rolling wave planning*) werden grob geplante Aktivitäten im Projektverlauf immer weiter detailliert und die Zeitplanung aktualisiert.

Parallel zur Planung des Projektumfangs und zum Projektzeitmanagement muss das Personalmanagement für ein Projekt beachtet werden. Es beinhaltet die Identifikation und Definition von Rollen im Projekt, Verantwortlichkeiten und notwendiger Expertisen. Weiterhin werden die Akquise, die Entwicklung und das Management des Projektteams zum Personalmanagement gezählt. Typische Ergebnisse sind **Organigramme** (engl. auch *organization breakdown structure, OBS*), **Rollenbeschreibungen** und **Verantwortlichkeitstabellen**. Als mögliche Tätigkeiten hinsichtlich der Entwicklung des Projektteams werden die für diese Arbeit relevanten **Team-Building Aktivitäten** und die **räumliche Zusammensetzung** (engl. *collocation*) genannt. Team-Building soll die Effektivität in der Zusammenarbeit fördern, indem Vertrauen und gute Arbeitsbeziehungen zwischen Teammitgliedern aufgebaut werden. Die Teamleistung kann außerdem durch die Schaffung räumlicher Nähe der Teammitglieder zueinander gesteigert werden. Die Zusammensetzung kann in einem Büro langfristig oder nur zu bestimmten Projektphasen erfolgen, oder durch die Bereitstellung von projektspezifischen

Besprechungsräumen („*war rooms*“) realisiert werden. Heutzutage gewinnt letztlich auch die Erleichterung der virtuellen Zusammenarbeit in **virtuellen Teams** stark an Bedeutung.

Projektmanagement-Standards adressieren außerdem die **Kommunikationsplanung**. Hierunter wird die Planung der Kommunikation zwischen allen Stakeholdern verstanden. Die Planung berücksichtigt einerseits die Informationsbedarfe und Anforderungen der Stakeholder und andererseits die verfügbaren Kommunikationsmittel und -wege. Besprechungen (engl. *meetings*) sind die verbreitetste Form, um Diskussionen und Dialoge zu ermöglichen. Sie können persönlich (engl. „*face-to-face*“) oder online stattfinden. Zur Verbreitung und Bereitstellung von Informationen sind unterschiedliche Informationssysteme denkbar, wie zum Beispiel Dokumentenmanagementsysteme oder Kollaborationsmanagementsysteme. Wie wichtig es ist festzulegen, wer mit wem kommuniziert, wird bei der Betrachtung der Anzahl aller denkbaren Kommunikationskanäle deutlich. Bei  $n$  Kommunikationspartnern sind  $n(n - 1)/2$  Kommunikationskanäle denkbar.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass diverse Pläne des Projektmanagements die Koordination der Entwicklungsarbeit adressieren. Die klassischen Methoden des Projektmanagements setzen jedoch voraus, dass die Abstimmungsbedarfe in Form von Abhängigkeiten zwischen Prozessschritten bekannt sind. Eine systematische, projektspezifische Identifikation von Abstimmungsbedarfen und den daraus resultierenden Bedarfen für Koordination wird nicht methodisch unterstützt. Im folgenden Kapitel werden deshalb Grundlagen über die Modellierung von Systemstrukturen erläutert, da die Analyse von Projektzusammenhängen mit Hilfe von Strukturmodellen eine Ableitung von Abstimmungsbedarfen ermöglicht.

## 2.4 Modellierung von Systemstrukturen

Die Modellierung von Systemen ermöglicht es, deren inhärente Zusammenhänge strukturell zu analysieren. Nachfolgend werden Modelle als Basis des Systemdenkens vorgestellt und erläutert, wie formale Modelle erzeugt werden können. Abschließend werden unterschiedliche Repräsentationsformen für Strukturmodelle aufgezeigt, auf die im weiteren Verlauf der Arbeit zurückgegriffen wird.

### 2.4.1 Modelle als Basis des Systemdenkens

Das Systemdenken basiert auf modellhaften (ggf. mentalen) Abbildungen von Systemen, um komplexe Zusammenhänge beherrschbar zu machen [Haberfellner *et al.* 2012, S. 41]. Unter einem Modell versteht man dabei nach der allgemeinen Modelltheorie von Stachowiak [1973] die Abbildung eines Originals, das für einen bestimmten Zweck relevante Attribute dieses Originals repräsentiert. Bei Systemmodellen entspricht das Original dem betrachteten System.

Haberfellner *et al.* [2012, S. 42-43] geben drei Sichtweisen für Systemmodelle an: Die umfeldorientierte Betrachtungsweise, die wirkungsorientierte Betrachtungsweise und die strukturorientierte Betrachtungsweise. Die umfeldorientierte Betrachtungsweise konzentriert sich auf das Umfeld eines Systems und zielt auf die Identifikation systemexterner Einflussfaktoren auf das System ab. Die wirkungsorientierte Betrachtungsweise geht einen Schritt weiter und zielt auf die Untersuchung der Wirkung externer Größen (Inputs) auf die Outputs eines Systems

ab, wobei das System selbst als Blackbox betrachtet wird. Im Kontext dieser Arbeit spielt vor allem die strukturorientierte Betrachtung eine Rolle, die auf die Betrachtung der Elemente eines Systems und deren Beziehungen untereinander abzielt. Systemmodelle zur strukturorientierten Betrachtung werden in dieser Arbeit auch als **Strukturmodelle** bezeichnet. Tabelle 2-2 zeigt Beispiele für solche Modelle, die den fünf Subsystemen eines Projektsystems zugeordnet werden können.

*Tabelle 2-2 Beispiele für Strukturmodelle der fünf Projektsysteme.*

| <b>System</b>       | <b>Beispielmodelle</b>   |
|---------------------|--|
| Produktsystem       | Funktionsmodelle, Baustuktur, Produktarchitekturmodelle            |
| Organisationssystem | Organigramme   |
| Prozesssystem       | Prozessmodelle   |
| Toolsystem          | Datenflussdiagramme, IT-Infrastrukturdiagramme                     |
| Zielsystem          | Zielhierarchien, House of Quality (im Quality Function Deployment) |

Diese Sichtweisen stellen bereits unterschiedliche Modellzwecke dar. Modellzwecke können weiterhin nach dem Verwendungszweck eingeteilt werden. Für eine umfassende Auflistung wird an dieser Stelle auf Kohn [2014, S. 28-29] verwiesen. Zusammenfassend werden im Kontext dieser Arbeit folgende **Verwendungszwecke** für Strukturmodelle festgehalten:

- Visualisierung
- Analyse
- Dokumentation

Meistens basiert die tatsächliche Verwendung eines Modells auf einer Kombination dieser grundsätzlichen Modellzwecke. In der Praxis werden sie dann weiterhin zur Planung, zur Gestaltung oder zur Überwachung bzw. Kontrolle von Systemen genutzt.

Walden *et al.* [2015, S. 183] verweisen zusätzlich auf unterschiedliche Modelltypen und unterscheiden zunächst physische Modelle von abstrakten Modellen. Abstrakte Modelle lassen sich weiter in formale, semi-formale und nicht-formale Modelle gliedern. Während nicht-formale Modelle wie zum Beispiel freie Textbeschreibungen oder einfache Skizzen keinen definierten Modellierungsregeln folgen, sind diese für formale Modelle wie Geometriemodelle, mathematischen Modelle oder Logikmodelle bzw. „conceptual models“ vorgegeben [Walden *et al.* 2015, S. 184]. Semi-formale Modelle stellen eine Kombination aus formalen und nicht-formalen Bestandteilen dar. Formale Modelle werden häufig in Form von Graphen mit Knoten und Kanten oder in Tabellen bzw. Matrizen repräsentiert. In dieser Form entsprechen sie den bereits erwähnten Strukturmodellen. Im folgenden Kapitel werden weitere Grundlagen der Modellierung zusammengefasst, bevor auf die zwei Repräsentationsformen näher eingegangen wird.

## 2.4.2 Metamodelle als Basis formaler Modellierung

Formale Modelle sind Modelle, die nach bestimmten Modellierungsregeln bzw. einer Modellierungssprache erstellt wurden. Das macht sie formal, also rechnerisch interpretierbar. Eine Modellierungssprache ist durch eine definierte Syntax und Semantik zur Erstellung eines Modells definiert. Die Syntax stellt einen Formalismus dar, wie Elemente modelliert werden und die Semantik beschreibt, wie die Bedeutung modellierter Elemente zu interpretieren ist. Ein Metamodell ist ein Modell einer Modellierungssprache [Favre 2005, S. 14], das die Syntax der Modellierungssprache formell beschreibt<sup>9</sup> [Höfferer 2007, S. 1625]. Die Semantik wird dagegen in einer Ontologie festgelegt [Höfferer 2007], wobei ein Metamodell häufig auch ontologische Anteile hat [Kühne 2006, S. 382]. Dies wird in Abbildung 2-8 deutlich. Das Metamodell beschreibt hier nicht nur, dass ein elliptisch repräsentiertes Objekt der Klasse „Autobahn“ mit genau zwei rechteckig repräsentierten Objekten der Klasse „Stadt“ verbunden sein kann. Die der deutschen Sprache zugrunde liegende Ontologie führt dazu, dass die Bedeutung einer Modellinstanz entsprechend interpretiert werden kann (z. B.: Um auf Autobahnen von München nach Frankfurt zu fahren, führt der Weg über Nürnberg).

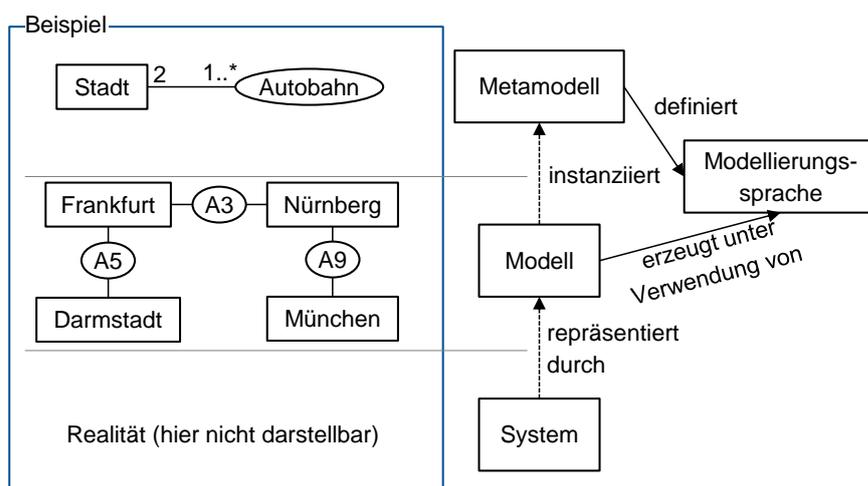


Abbildung 2-8 Illustratives Beispiel des Zusammenhangs von Metamodell und Modell in Anlehnung an Höfferer [2007, S. 1622, Figure 2] und Kühne [2006, S. 380, Fig. 6].

Letztlich basiert jede Modellierung samt Metamodell auf einer grundsätzlichen Repräsentationsform, wie z. B. einer rein textuellen Beschreibung, einer grafischen Darstellung (ein Schaubild oder eine sichtbare Tabelle/Matrix) oder einer Datenlogik (eine für einen Rechner interpretierbare Logik zur Speicherung von Daten). Die für diese Arbeit besonders relevante Repräsentation von Strukturmodellen wird im folgenden Kapitel genauer beleuchtet.

<sup>9</sup> Für diese formale Beschreibung ist wiederum eine „Meta-Modellierungssprache“ notwendig. Für weitere Details sei hier auf Höfferer [2007], Kühne [2006] oder Favre [2005] verwiesen.

### 2.4.3 Repräsentation von Strukturmodellen

Der Begriff Repräsentation ist schwer vom Modellbegriff zu unterscheiden, weil jede Repräsentation eines Modells wiederum selbst ein Modell darstellt. In dieser Arbeit ist mit einer Repräsentation eine explizierte Darstellungsmöglichkeit bzw. Speicherform für ein Modell gemeint. Die Darstellungsmöglichkeit dient dabei nicht zwingend der Visualisierung per se, sondern macht ein Modell erst greifbar bzw. handhabbar, um es für Analysen oder zur Dokumentation zu nutzen. Der Definition eines Frameworks nach O'Donovan *et al.* [2005, S. 72] folgend kann eine Repräsentationsform auch als Modellierungs-Framework zur Definition eines Metamodells bezeichnet werden (vgl. Kapitel 2.4.2), wobei unterschiedliche Repräsentationen verschiedene Perspektiven auf ein System ermöglichen.

Die zwei wesentlichen Darstellungsmöglichkeiten von Strukturmodellen sind graphenbasierte oder matrixbasierte Repräsentationen [Helms & Kissel 2016, S. 980]. Eine Systemstruktur besteht aus einer Menge von  $n$  Entitäten (Knoten,  $V$ ) und Relationen zwischen diesen Entitäten (Kanten,  $E$ ), was mathematisch betrachtet als ein Graph  $G = (V, E)$  bezeichnet wird. In der Mathematik wird ein Graph durch seine Adjazenzmatrix  $A(G)$  als  $n \times n$  Matrix repräsentiert [Helms & Kissel 2016, S. 985; Tittmann 2003, S. 12].

$$A(G) = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}; a_{ij} \text{ entspricht der Anzahl der Kanten zwischen den Knoten } i \text{ und } j, \text{ mit } i, j \text{ von } 1 \dots n.$$

In der Regel versteht man im Ingenieurskontext unter einem „Graphen“ jedoch nicht das entsprechende mathematische Konstrukt, sondern die „grafische Darstellung“ dessen. In dieser Arbeit soll der Begriff Graph gleichbedeutend mit der einem Strukturmodell zugrundeliegenden Systemstruktur verstanden werden. Visuelle Darstellungen eines Graphen in Form eines Schaubilds mit Elementen und Verbindungslinien werden als graphenbasierte Repräsentationen oder kürzer als Graph-Ansicht (engl. *node-link diagram*) bezeichnet. Eine beispielhafte graphenbasierte Repräsentation einer Systemstruktur ist in Abbildung 2-9 links dargestellt. Dieselbe Systemstruktur lässt sich matrixbasiert repräsentieren, indem die Adjazenzmatrix in einer anschaulichen Tabellenform dargestellt wird (Abbildung 2-9, rechts). Im Folgenden werden die beiden Repräsentationsformen näher erläutert.

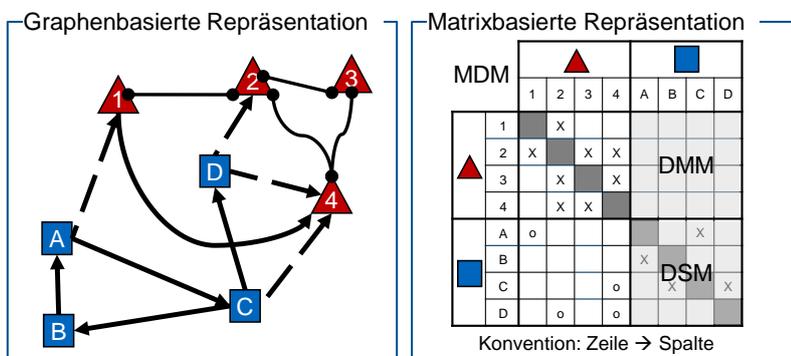


Abbildung 2-9 Gegenüberstellung der graphenbasierten und matrixbasierten Repräsentation einer Systemstruktur in Anlehnung an Lindemann *et al.* [2009, S. 70-78]. MDM: Multiple Domain Matrix; DMM: Domain Mapping Matrix; DSM: Design Structure Matrix.

## Graphenbasierte Repräsentation

Die aus der Mathematik stammende Graphentheorie versteht Graphen als Menge von Knoten und Kanten, die jeweils vom selben Typ sind. Das heißt alle Knoten können einer Domäne bzw. Klasse zugeordnet werden und alle Relationen sind von derselben Art [Helms & Kissel 2016, S. 985]. Bei der Betrachtung komplexer Systemstrukturen sind jedoch Elemente aus verschiedenen Domänen und mehrere Relationsarten zwischen ihnen relevant. Solche Systemstrukturen werden in sogenannten **typisierten Graphen** dargestellt [Helms & Kissel 2016, S. 985]. Eine grundlegende Unterscheidung der Relationsarten ist nach gerichteten und ungerichteten Kanten möglich. Beispielsweise stellt eine Kontaktbedingung zwischen zwei Komponenten eine ungerichtete Kante dar und ein Fluss zwischen zwei Komponenten (Energiefluss, Signalfluss, Materialfluss) eine gerichtete Kante.

Jedem Knoten und jeder Kante können zusätzlich Attribute zugewiesen werden. Dann spricht man von einem **attribuierten typisierten Graph** [Helms & Kissel 2016, S. 986]. Die in Abbildung 2-9 gezeigten Knoten und Kanten weisen zum Beispiel unterschiedliche Ausprägungen der Attribute *Form* und *Farbe* auf, wobei sich die drei Kantentypen nur in ihrer Form unterscheiden. Es handelt sich um Attribute, die einzig der Visualisierung dienen. Weitere Attribute zur Speicherung und Darstellung zusätzlicher Informationen für Knoten und Kanten können definiert werden und ggf. auch in einer Graph-Ansicht visualisiert werden (z. B. die Bezeichnung der Knoten).

Die räumliche Anordnung der Knoten hat zunächst keine Bedeutung. Es gibt jedoch auch Möglichkeiten das Layout einer Graph-Ansicht nach bestimmten Regeln zu ermitteln. Ist zum Beispiel die Stärke eines Zusammenhangs als Attribut einer Kante angegeben, richtet sich die Länge der Kanten und damit die Position der Knoten in einem „sogenannten stärkebasierten Graph“(-Schaubild) nach dem Wert der Stärke [Lindemann *et al.* 2009, S. 95-97]. Weitere häufig verwendete Layouts sind Netzwerk-Layouts, Hierarchie-Layouts und Kreis-Layouts<sup>10</sup>. Gewisse strukturelle Merkmale oder Attributausprägungen können so in einer Graph-Ansicht veranschaulicht werden. Graphenbasierte Modelle wie zum Beispiel Petri-Netze, IDEF0, IDEF3, PERT-Diagramme oder GERT-Diagramme (vgl. Kapitel 3.1.3) ermöglichen eine quantitative und rechnerbasierte Analyse des betrachteten Systems [Browning & Ramasesh 2007, S. 231-232]. Eine Vielzahl graphenbasierter Modelle zielt jedoch nicht auf eine quantitative Analyse ab, sondern lediglich auf eine zusammenfassende Darstellung architektonischer Informationen über das System [Parraguez 2015, S. 37].

## Matrixbasierte Repräsentation

Alternativ können Systemstrukturen in Matrixform dargestellt werden. Eine Matrix, die nur Elemente einer Domäne und deren Relationen darstellt, wird Design Structure Matrix (DSM) genannt [Eppinger & Browning 2012; Lindemann *et al.* 2009]. Die betrachteten Elemente sind darin sowohl in den Zeilen als auch den Spalten aufgetragen. Jede Zelle (abgesehen von denen auf der Diagonalen) steht für eine Relation zwischen den Elementen in der entsprechenden Zeile bzw. Spalte. Die Einträge in den Zellen können entweder binär angeben, ob

---

<sup>10</sup> Als Startpunkt für weitere Informationen zu Graph-Layouts sei hier auf Wikipedia verwiesen: [https://en.wikipedia.org/wiki/Graph\\_drawing](https://en.wikipedia.org/wiki/Graph_drawing), zuletzt aufgerufen am 07.10.2016.

eine Relation vorhanden ist oder nicht, oder anhand eines Werts eine bestimmte Bedeutung wie zum Beispiel die Art der Relation oder eine Gewichtung indizieren. Eine DSM ist immer quadratisch und außerdem symmetrisch, wenn die Relationen zwischen den Elementen ungerichtet sind (vgl. Relationen zwischen den Dreiecken in Abbildung 2-9, rechts).

Relationen zwischen Elementen zweier verschiedener Domänen können in einer sogenannten Domain Mapping Matrix (DMM) abgebildet werden [Danilovic & Browning 2007]. Lindemann *et al.* [2009] prägen außerdem den Begriff Multiple Domain Matrix (MDM) (vgl. Abbildung 2-9). Eine MDM ist die übergeordnete Sicht auf DSMs und DMMs von betrachteten Domänen und stellt selbst wieder eine quadratische Matrix dar.

Wenn die Relationen zwischen zwei Domänen ungerichtet sind, ist die MDM in Bezug auf die zwei entsprechenden DMMs (z. B. Dreieck  $\rightarrow$  Viereck; Viereck  $\rightarrow$  Dreieck in Abbildung 2-9) symmetrisch. Für ungerichtete Relationen ist die Leserichtung in einer Matrix unerheblich. Wenn gerichtete Relationen in einer Matrix berücksichtigt werden ist es wichtig die Leserichtung mit anzugeben. In dieser Arbeit wird in Anlehnung an Lindemann *et al.* [2009] stets die Konvention „Zeile  $\rightarrow$  Spalte“ verwendet. Das heißt, dass der Ursprungsknoten einer Relation in der Zeile steht und der Zielknoten in der Spalte.

Auf der Modellierung von Systemstrukturen bauen schließlich die Ansätze des strukturellen Komplexitätsmanagements auf, die in dieser Arbeit zur Betrachtung komplexer Entwicklungsprojekte herangezogen werden. Relevante Grundlagen werden im folgenden Kapitel erläutert.

## 2.5 Strukturelles Komplexitätsmanagement

Klassische Strategien im Umgang mit Komplexität sind [Lindemann *et al.* 2009, S. 31-36]:

- Komplexität vermeiden und reduzieren
- Komplexität erfassen und bewerten
- Komplexität beherrschen und kontrollieren

Im Kontext dieser Arbeit spielt vor allem die Beherrschung und Kontrolle eine Rolle, wobei die Erfassung und Bewertung eine Voraussetzung dafür darstellt. Zur Erfassung und Bewertung kommen Methoden zur Modellierung von Systemstrukturen und Komplexitätskennzahlen zum Einsatz. Die Modellierung von Systemstrukturen erfolgt mittels Graphen und deren entsprechenden Repräsentation in Graph-Ansichten oder Matrizen (vgl. Kapitel 2.4.3). Eine Vielzahl möglicher Kennwerte zur Komplexitätsbewertung ergibt sich aus Strukturmerkmalen, welche in Kapitel 2.5.2 vorgestellt werden. Davor werden relevante Begriffe aus der Graphen- und Netzwerktheorie erläutert. Mit Bezug auf die Beherrschung und Kontrolle von Komplexität werden anschließend Ansätze zur weitergehenden Analyse von Systemstrukturen aufgezeigt.

### 2.5.1 Graphentheorie und Netzwerktheorie

Der Begriff *Graph* wurde bereits in Kapitel 2.4.3 eingeführt. Die Graphentheorie adressiert strukturelle Fragen einer Netzstruktur [Tittmann 2003, S. 11]. Der Begriff *Netzwerk* bezieht

sich auf das konkrete Phänomen in der Realität (Original), während der Graph ein Modell (Abbild) des Netzwerks ist [Wasserman & Faust 1994, S. 93-94]. Die Graphentheorie ist insofern nicht eindeutig von der Netzwerktheorie abgrenzbar. Kreimeyer & Lindemann [2011, S. 55] beschreiben den Unterschied darin, dass sich die Graphentheorie auf die Modellierung und Analyse des Zusammenspiels bestimmter Knoten und Kanten in einem Netzwerk von begrenzter Größe konzentriert. Die Netzwerktheorie zielt dagegen darauf ab sehr große Netzwerke in ihrer Gesamtheit abzubilden. Dies ermöglicht die Identifikation statistischer Merkmale zur Beschreibung des Netzwerks und zur Vorhersage des Netzwerkverhaltens.

Ein Graph besteht grundlegend aus Knoten und Kanten. Ein Graph, in dem mehr als ein Kantentyp unterschieden wird, heißt *Multigraph* [Wasserman & Faust 1994, S. 145-146]. Enthält ein Graph nur einen Knotentyp, wird er als *einfach* (engl. *one-mode*) bezeichnet und bei zwei Knotentypen als *zweifach* (engl. *two-mode*) [Wasserman & Faust 1994, S. 36-41]. Wenn er  $n$  Knotentypen beinhaltet kann er entsprechend als *n-fach* bezeichnet werden. Ein *Subgraph* stellt einen möglichen Ausschnitt aus dem Gesamtgraphen dar.

Die Strukturmerkmale, die im nachfolgenden Kapitel betrachtet werden, setzen größtenteils voraus, dass der für die Analyse zugrundeliegende Graph *beschränkt* (engl. *bounded*) ist. Das heißt er ist in Bezug auf Knoten und Kanten, die die Systemstruktur beeinflussen, vollständig. Es wird jedoch als unmöglich angesehen, ein vollständiges Modell eines Entwicklungsprojekts zu erstellen [O'Donovan 2004, S. 26]. *Unbeschränkte Netzwerke* (engl. *unbounded networks*) sind unter anderem durch fehlende Informationen über das Netzwerk charakterisiert [Ellison *et al.* 1997, S. 2]. Trotzdem wird in dieser Arbeit angenommen, dass die entsprechenden Kennzahlen für Projektsysteme angewendet werden können. Diese Annäherung muss jedoch bei der Interpretation der Ergebnisse stets berücksichtigt werden.

## 2.5.2 Allgemeine Strukturmerkmale zur Systemanalyse

Wasserman & Faust [1994, S. 29] weisen auf einen Unterschied zwischen *Struktur* und *Komposition* eines Netzwerks hin. Wie bereits in Kapitel 2.1.2 definiert, beschreibt die Struktur die Anordnung von Elementen und deren Beziehungen zueinander. Die Komposition gibt dagegen – auf Basis von Attribut-Informationen – Aufschluss über die Beschaffenheit der Elemente und deren Relationen [Parraguez 2015, S. 30; Wasserman & Faust 1994, S. 29]<sup>11</sup>. In attribuierten typisierten Graphen ist die Komposition neben der Diversität von Attributen zusätzlich durch die unterschiedenen Knoten- und Kantentypen verkörpert. Es existieren vereinzelte Ansätze zur systematischen (quantitativen) Analyse der Komposition (vgl. Parraguez [2015, S. 41-42]), diese Arbeit fokussiert jedoch auf die Analyse der explizierten Systemstruktur. Es wird argumentiert, dass die Komposition eines Systems letztlich bei der Systembetrachtung qualitativ interpretiert werden kann.

Die Graphentheorie stellt zur Analyse von Systemstrukturen allgemeine Merkmale bereit, die zunächst unabhängig vom betrachteten System beschrieben und interpretiert werden können. Eine tatsächliche Bedeutung bekommen diese jedoch erst durch Anwendung und Interpretati-

---

<sup>11</sup> Beispiel: Bekanntschaftsbeziehungen bilden eine mögliche Struktur in einem Personennetzwerk. Die Komposition kann dann beispielsweise hinsichtlich der Unterscheidung der Geschlechter untersucht werden.

on für ein spezifisches System bestehend aus bestimmten Knoten- und Kantentypen. Im Folgenden werden allgemeine Strukturmerkmale vorgestellt.

Generell können die Strukturmerkmale auf einzelne Graphbestandteile oder den gesamten Graphen bezogen werden, was in vier Analyseebenen resultiert [Parraguez 2015, S. 35; Wasserman & Faust 1994, 17-21, 25-26]:

1. **Knoten:** Eigenschaften bezogen auf einzelne Knoten. Sie drücken die Rolle eines Knotens im Netzwerk aus und geben Aufschluss über benachbarte Kanten und Knoten.
2. **Kanten:** Eigenschaften bezogen auf einzelne Kanten. Nachdem Kanten zwei Knoten miteinander verbinden, können diese Eigenschaften auch Aufschluss über Knoteneigenschaften geben.
3. **Subgraph:** Eigenschaften bezogen auf eine Gruppe von Knoten und Kanten. Diese Gruppen können beispielsweise basierend auf den Eigenschaftsausprägungen beinhaltender Knoten und Kanten gebildet werden.
4. **Netzwerk:** Eigenschaften bezogen auf den kompletten Graphen. Sie bilden eine Referenz einerseits für die Merkmale auf Knoten-, Kanten- und Subgraphenebene, und andererseits zur Gegenüberstellung verschiedener Netzwerke.

An dieser Stelle sei auf ausführliche Übersichten und Beschreibungen von Strukturmerkmalen verwiesen [Kreimeyer & Lindemann 2011, S. 293; Lindemann *et al.* 2009; Parraguez 2015; Wasserman & Faust 1994]. Nachfolgend werden in der Literatur häufig genannte Merkmale erläutert.

### Strukturmerkmale auf Knoten-Ebene

Die Rolle eines Knotens innerhalb eines Netzwerks kann über dessen Einbindung in das Netzwerk charakterisiert werden. Eine Basisgröße zur quantitativen Beschreibung der Einbindung ist die **Zentralität** (engl. *centrality*). Nachdem unterschiedliche Aspekte der Einbindung betrachtet werden können, gibt es mehrere Zentralitätswerte. Werte für einen Knoten werden in der Regel auch relativ zu den entsprechenden Werten der restlichen Knoten im Netzwerk interpretiert [Parraguez 2015, S. 38]. Häufig betrachtete Zentralitätswerte für einen Knoten  $k$  sind:

- **Degree Centrality:** Anzahl der Kanten, die den Knoten mit anderen Knoten  $k$  verbinden. Bei gerichteten Kanten wird die **Aktivsumme** (engl. *out-degree*) als Anzahl ausgehender Kanten von der **Passivsumme** (engl. *in-degree*) als Anzahl eingehender Kanten unterschieden. Die Aktivsumme ist ein Indikator dafür, wie stark das betrachtete Element das Restsystem beeinflusst und die Passivsumme indiziert wie stark das Element vom Restsystem beeinflusst wird. Zur Gegenüberstellung aller Knoten werden die Kennzahlen **Aktivität** (engl. *in-out-degree ratio*) als Quotient aus Aktivsumme und Passivsumme oder **Kritikalität** als Produkt aus Aktivsumme und Passivsumme verwendet [Lindemann *et al.* 2009, S. 129].
- **Closeness Centrality:** „Summe der graphentheoretischen Abstände [des Knotens  $k$ ] zu allen anderen Knoten, wobei der Abstand von einem Knoten zum anderen als die Länge (Anzahl Kanten) des kürzesten Pfads zwischen beiden Knoten definiert ist“ [Borgatti

2005, S. 59, freie Übersetzung des Autors aus dem Englischen]. Die Messgröße spiegelt also die strukturelle Nähe eines Knotens zu allen anderen Knoten wider.

- **Betweenness Centrality:** Anzahl, wie oft der Knoten  $k$  auf dem jeweils kürzesten Pfad zwischen allen anderen Knotenpaaren im Netzwerk liegt [Borgatti 2005, S. 60].
- **Node Information Centrality:** Kombination der Aspekte der *Closeness Centrality* und *Betweenness Centrality*, wobei nicht nur der kürzeste Pfad sondern alle möglichen Pfade zwischen zwei Knoten gezählt werden.
- **Eigenvector Centrality:** Kennzahl, in der die Zentralität des Knotens  $k$  in Relation zur Zentralität direkter Nachbarknoten angegeben wird.

Es ist anzumerken, dass sich die allgemeinen Strukturmerkmale zunächst auf *einfache* Graphen beziehen. Sobald  $n$ -fache Multigraphen untersucht werden sollen, muss geprüft werden, welche Knoten- und Kantenklassen bei der Berechnung berücksichtigt werden sollen. Außerdem sei erwähnt, dass die Zentralitäts-Messgrößen sich zwar auf einzelne Knoten beziehen, jedoch abgesehen von der *Degree Centrality* auch auf dem kompletten Netzwerk basieren.

### Strukturmerkmale auf Subgraph- bzw. Netzwerk-Ebene

Die Merkmale auf Subgraph-Ebene und auf Netzwerk-Ebene sind identisch, weil jeder Subgraph auch wieder als für sich kompletter Graph gesehen werden kann. Triviale Merkmale beschreiben die **Größe** (engl. *size*) eines Subgraphen bzw. Netzwerks anhand der absoluten Anzahl von Knoten oder Anzahl von Kanten. Die **Dichte** (engl. *relational density*)<sup>12</sup> wird durch den Quotienten aus der Anzahl vorkommender Kanten und der Anzahl theoretisch möglicher Kanten charakterisiert [Kreimeyer & Lindemann 2011, S. 294-302; Parraguez 2015, S. 40]. Die **Diversität** eines  $n$ -fachen Multigraphen kann über die Anzahl der Knoten- bzw. Kantentypen bemessen werden. Weiterhin wird die **Distanz** zweier Knoten über die Länge des kürzesten Pfads zwischen den Knoten bestimmt [Lindemann *et al.* 2009, S. 132].

### Strukturmerkmale auf Kanten-Ebene

Es existieren wenige Ansätze zur Berechnung struktureller Kennzahlen auf Kantenebene. Letztlich kann aber mittels eines sogenannten *Line Graph* jedes Merkmal auf Knoten-Ebene auf die Kanten-Ebene übertragen werden, in dem jede Kante als Knoten und vice versa modelliert wird. Kanten können außerdem bezüglich der Eigenschaften der zwei verbundenen Knoten charakterisiert werden. Eine sogenannte **Brücken-Kante** ist beispielsweise eine Kante, die zwei Subgraphen (z. B. zwei Cluster) als einzige Kante miteinander verbindet.

## 2.5.3 Methoden zur Strukturanalyse

Systemstrukturen können weitergehend analysiert werden, indem indirekte Zusammenhänge zwischen Systemelementen betrachtet werden. Lindemann *et al.* [2009, S. 105] unterscheiden sechs grundlegende Logiken zur **Ableitung indirekter Abhängigkeiten** (Abbildung 2-10).

<sup>12</sup> Bei Lindemann *et al.* [2009, S. 137] *Degree of Connectivity* genannt.

Mit einer matrixbasierten Repräsentation von Strukturdaten lässt sich eine resultierende Matrix  $DSM_R$  nach diesen sechs Fällen durch Matrixmultiplikation wie folgt berechnen:

- Fall 1:  $DSM_R = DMM_{RK} \cdot DMM_{RK}^T$
- Fall 2:  $DSM_R = DMM_{KR} \cdot DMM_{KR}^T$
- Fall 3:  $DSM_R = DMM_{RK} \cdot DMM_{KR}$
- Fall 4:  $DSM_R = DMM_{RK} \cdot DSM_K \cdot DMM_{RK}^T$
- Fall 5:  $DSM_R = DMM_{KR} \cdot DSM_K \cdot DMM_{KR}^T$
- Fall 6:  $DSM_R = DMM_{RK} \cdot DSM_K \cdot DMM_{KR}$

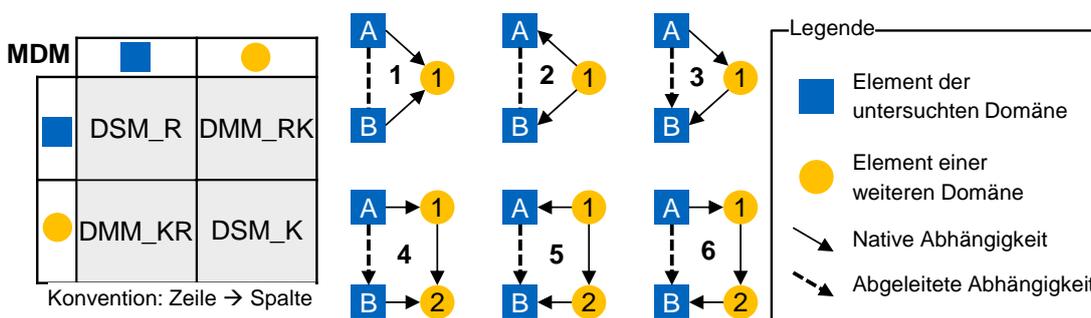


Abbildung 2-10 Logiken zur Ableitung indirekter Abhängigkeiten in Anlehnung an Lindemann et al. [2009, S. 105, Fig. 7-5].

Bei der Analyse realer Netzwerke sind aufwändigere Kombinationen als diese sechs Grundtypen denkbar. Zusätzlich könnten Bedingungen (z. B. gewisse Attribut-Ausprägungen der Elemente) relevant sein, die die Ableitung mittels Matrixmultiplikation erschwert. In solchen Fällen ist die Ableitung der Zusammenhänge mittels Graphentransformation von Vorteil.

Die sogenannte **Graphentransformation** (engl. auch *graph rewriting*) ermöglicht die rechnerbasierte Handhabung graphenbasierter Strukturen [Helms & Kissel 2016, S. 991]. Durch die Graphentransformation können also vordefinierte Operationen, Berechnungen und Modifikationen an einem Graphen automatisiert ausgeführt werden. In Form von *Regeln* wird ein bestimmtes Muster, nach dem im Graphen gesucht werden soll, als Vorbedingung spezifiziert. Eine Nachbedingung beschreibt die entsprechende Transformation, die mit dem Muster ausgeführt werden soll. Im Beispiel in Abbildung 2-11 wird die dargestellte Kombination von *Dreieck*, *Viereck* und *Kreis* gesucht. Die Transformation gibt an, dass das Dreieck samt Relation gelöscht werden soll, und ein Sechseck mit Relation zum Viereck hinzugefügt werden soll. Neben Hinzufügen, Löschen oder Ersetzen von Knoten/Kanten können auch beliebige Rechenoperationen mit Attributen ausgeführt werden und die Ergebnisse wiederum in Attributen gespeichert werden.

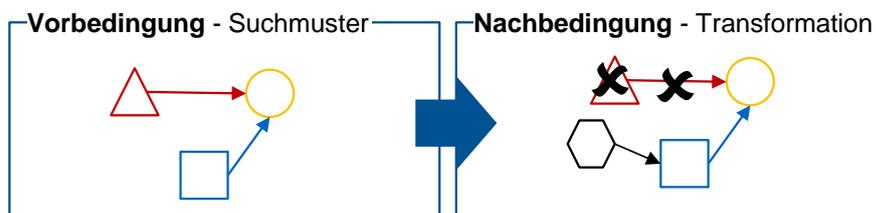


Abbildung 2-11 Veranschaulichung einer Graphentransformationsregel in Anlehnung an Helms & Kissel [2016, S. 993, Bild 6.11].

Mittels *Sequenzen* lassen sich Regeln auch mehrmals auf einen Graphen anwenden, sodass jeder dem Muster entsprechende und im Ausgangsgraphen vorkommende Subgraph transformiert wird. Außerdem lassen sich mehrere Regeln in Sequenzen miteinander kombinieren. Zusätzlich können innerhalb von Sequenzen andere Sequenzen aufgerufen werden, und durch logische Operatoren bedingt aufgerufen werden. Das Transformationsergebnis wird in einem Ergebnisgraphen gespeichert [Helms & Kissel 2016, S. 992]. Ein großer Vorteil der Graphentransformation wird darin gesehen, dass die Ausführung auf große Datenmengen informationstechnisch sehr effizient im Vergleich zu Datenbankabfragen ist. Zur programmtechnischen Umsetzung von Graphentransformationen existieren unterschiedliche Programmiersprachen wie zum Beispiel GrGen.NET<sup>13</sup>, die eine vereinfachte Notation zur Definition der Transformationsregeln und -sequenzen bereitstellen.

Grundsätzlich gelten Matrizen zur Abbildung von Systemarchitekturen als besser geeignet [Göpfert 2009, S. 25]. Die Darstellung mittels Matrizen hat jedoch hinsichtlich der Analyse-möglichkeiten seine Grenzen [Kreimeyer & Lindemann 2011, S. 53-54]:

- Mehrere Attribute von Kanten können nur begrenzt abgebildet werden.
- Logische Operatoren lassen sich in einer Matrix nicht ohne weiteres abbilden.
- Modellvarianten, basierend auf einer gemeinsamen Basis, lassen sich nur schwer abbilden.
- Existierende Matrixnotationen ermöglichen es nicht, Bedingungen für Elemente oder Relationen zu berücksichtigen.
- Die Entwicklung eines Systems über die Zeit kann nicht abgebildet werden.
- Der Umgang mit der Dekomposition von Elementen und hierarchieübergreifenden Relationen ist nicht abschließend gelöst.

Zusätzlich können unterschiedliche Relationstypen nur begrenzt abgebildet werden. Welche Darstellungsform im Allgemeinen besser zur Visualisierung von Strukturdaten geeignet ist, lässt sich nicht pauschal bewerten (vgl. Keller *et al.* [2006, S. 75-76]). Graph-Ansichten werden aber häufig als intuitiv verständlicher beschrieben (z. B. Lindemann *et al.* [2009, S. 94-95]).

<sup>13</sup> Graph Rewrite Generator. Mehr Informationen auf <http://www.info.uni-karlsruhe.de/software/grgen/>, zuletzt aufgerufen am 13.10.2016.

Die Graphentheorie und darauf aufbauende Ansätze des strukturellen Komplexitätsmanagements stellen schließlich ungeachtet der gewählten Repräsentationsform das grundlegende Handwerkszeug zur Verfügung, um komplexe Systeme hinsichtlich ihrer Zusammenhänge und Abhängigkeiten rechnerbasiert zu analysieren. Dadurch wird letztlich das Management von Abhängigkeiten zur Unterstützung der Koordination im Projekt ermöglicht.

### **3. Stand der Forschung und Technik**

*Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen wird in diesem Kapitel der Stand der Forschung und Technik speziell mit Bezug auf die in Kapitel 1.2 formulierte Problem- und Zielstellung beschrieben. In Hinblick auf eine systematische Koordinationsplanung auf Basis struktureller Zusammenhänge wird zunächst aufgezeigt, welche Modellierungsansätze und Modelle nützliche Entwicklungsdaten zur strukturellen Analyse zur Verfügung stellen. Anschließend werden zentrale Aspekte im Umgang mit Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten diskutiert. Darüber hinaus werden existierende Ansätze zur strukturellen Analyse von Projektsystemen betrachtet, die in die Entwicklung des Unterstützungsansatzes mit einfließen. Die Betrachtung moderner Ansätze zum Management von Entwicklungsdaten liefert schließlich ein methodisches Rahmenwerk, das eine datengetriebene Lösung zur strukturbasierten Koordinationsplanung befähigt. In einer abschließenden Zusammenfassung wird ein Fazit gezogen und der Unterstützungsbedarf formuliert.*

#### **3.1 Vorhandene Modellierungsansätze und Modelle**

Grundlage für die methodische Beherrschung der Komplexität von Systemen ist die Modellierung (vgl. Kapitel 2.5). Im Folgenden werden vorhandene Modellierungsansätze und verbreitete Modelle zunächst einzeln für die drei Teilsysteme Produktsystem, Organisationssystem und Prozesssystem vorgestellt. Anschließend werden Ansätze und Modelle aufgezeigt, die jeweils zwei bzw. alle drei Teilsysteme integriert betrachten. Besonderes Augenmerk liegt letztlich auf formalen Modellen, in denen strukturelle Zusammenhänge des betrachteten Systems repräsentiert sind und für rechnerbasierte Analysen weiterverwendet werden können.

##### **3.1.1 Produktsystem**

Das Produktsystem in einem Entwicklungsprojekt verkörpert die Wissensbasis über die vorhandenen bzw. geplanten Elemente und Teilsysteme des zu entwickelnden Produkts sowie über deren Zusammenhänge [Parraguez 2015, S. 63]. Die Spezifikation der Produktinformationen in Form technischer Dokumente oder sonstiger Produktrepräsentationen, die im Entwicklungsprozess als Ergebnisse entstehen (im Folgenden auch als Entwicklungsartefakte bezeichnet), stellen unterschiedliche Produktmodelle dar [Ponn & Lindemann 2011, S. 20]. Produktmodelle unterscheiden sich dabei nicht nur hinsichtlich des betrachteten Produktumfangs (vgl. Aufbau mechatronischer Produkte, Kapitel 2.2.3) sondern auch bezüglich der Abstraktionsebene.

In der Konzeptphase und in der frühen Entwurfsphase einer Entwicklung sind Anforderungslisten, Funktionsstrukturen, Wirkstrukturen, Programmstrukturen (Software) und Baustrukturen (Hardware) typische Vertreter von Produktmodellen [VDI 1993, S. 14-16]. In späteren Phasen dominieren Modelle mit höherem Konkretisierungsgrad wie CAD-Modelle, Schaltpläne, Berechnungs- und Simulationsmodelle sowie Programmspezifikationen. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über typische Modellierungsansätze und Modelle auf den unterschiedli-

chen Abstraktionsebenen. Die Ebenen stammen aus der Konstruktionsmethodik nach Feldhusen *et al.* [2013a] bzw. aus dem Produktkonkretisierungsmodell nach Ponn & Lindemann [2011, S. 24-28]. Die identifizierten Modellierungsansätze und Modelle werden nachfolgend erläutert, bevor der Ansatz des Model-based Systems Engineering vorgestellt wird, der auf eine integrative Betrachtung der verschiedenen Produktmodelle abzielt.

*Tabelle 3-1 Zusammenfassung vorhandener Modellierungsansätze und Modelle in Anlehnung an Gehrke [2005]; Kohn [2014]; Ponn & Lindemann [2011].*

| <b>Abstraktionsebene</b> | <b>Modellierungsansätze und Modelle</b>  |
|--------------------------|--|
| Anforderungsebene        | Anforderungsbeschreibungen mittels Merkmal und Ausprägung in einer Anforderungsliste<br>Textuelle Dokumentation in Lasten- und Pflichtenheft<br>Korrelationsmatrix bzw. Wirkungsnetz zur Darstellung von Abhängigkeiten zwischen Anforderungen und zur Identifikation von Zielkonflikten<br>Verknüpfungsmatrix im <i>House of Quality</i> als Teil der Methode <i>Quality Function Deployment</i> (QFD)  |
| Funktionsebene           | Funktionsbeschreibungen durch Substantiv-Verb Kombinationen<br>Funktionszerlegung (Dekomposition)<br>Aufzählung der Funktionen in einer Funktionsliste<br>Umsatzorientierte Funktionsmodellierung<br>Relationsorientierte Funktionsmodellierung<br>Nutzerorientierte Funktionsmodellierung<br>Funktionsbaum zur Ableitung möglicher Funktionsalternativen<br>Blockschaltbilder<br>Funktionsschaltpläne, z. B. nach ISO 1219-1 [ISO 2012]<br>Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK)<br>UML-Diagramme (Objektorientierte Software-Strukturen), z. B. Use-Case-Diagramme<br>Fundamental Modeling Concepts (FMC) |
| Wirkebene                | Prinzipskizzen bzw. Schemazeichnungen<br>Morphologischer Kasten  |
| Bauebene                 | Dekomposition der Komponenten in einer Baustruktur<br>Einflussmatrix (DSM) bzw. Wirkungsnetz zur Modellierung der Vernetzung zwischen Systemelementen<br>2D- oder 3D-Geometriemodelle<br>Berechnungsmodelle (Statische Berechnung)<br>Simulationsmodelle (Ablauf- und Funktionssimulationen, Finite Elemente Methode, Mehrkörpersimulation, Computer Fluid Dynamics Simulation, Noise Vibration Harshness Simulation)  |

## Modellierung mechatronischer Systeme

Technische Entwicklungsziele und geforderte Produkteigenschaften werden durch **Anforderungen** repräsentiert. Sie werden zu Beginn einer Entwicklung erhoben und dokumentiert, aber im Laufe der Entwicklung erweitert, detailliert und modifiziert [Ponn & Lindemann 2011, S. 26]. Einblicke in die Industrie zeigen, dass Anforderungen häufig in textueller Form in einem Lastenheft bzw. einem entsprechenden Pflichtenheft beschrieben werden. Aktuelle Ansätze im Anforderungsmanagement (Forschung und industrielle Software) sehen eine formale, datenbankbasierte Modellierung der Anforderungen vor und betonen die Wichtigkeit der Nachvollziehbarkeit (engl. *traceability*) bezüglich Herkunft und Veränderungen von Anforderungen (z. B. Pohl [2010]; Versteegen *et al.* [2004]). Eine entsprechende **Anforderungsdatenbank** wird im Laufe der Entwicklung kontinuierlich gepflegt und ermöglicht es sowohl hierarchische als auch strukturelle Beziehungen zwischen Anforderungen abzubilden (z. B. komplementäre oder im Konflikt stehende Anforderungen).

Um eine technische Aufgabe zu lösen muss ein Zusammenhang gefunden werden, der Eingangsgrößen in gewünschte Ausgangsgrößen überführt. Dieser Zusammenhang wird als Funktion bezeichnet und wird zunächst lösungsunabhängig und abstrakt definiert [Feldhusen *et al.* 2013b, S. 44]. Im Rahmen der weiteren Spezifikation des Produkts werden also **Funktionsmodelle** erstellt, die in der Regel einer formalen Notation folgen. Eine Gesamtfunktion kann in Teilfunktionen dekomponiert werden und diesen wiederum Eingangs- und Ausgangsgrößen in Form von Energie-, Stoff- und Signalflüssen zugeordnet werden. Daraus ergibt sich die Funktionsstruktur [Czichos 2008, S. 53; Feldhusen *et al.* 2013a, S. 240-242]. In Funktionsmodellen bleibt zunächst offen, welche technische Domäne an der Erfüllung einer Funktion beteiligt ist. Häufig kann eine Teilfunktion über mehr als eine Domäne realisiert werden, was zu einer hohen Variabilität der Domänenstruktur führt [Jansen 2007, S. 10]. Der Erstellungsprozess einer Domänenstruktur und ihrer internen Wechselwirkungen wird in der Mechatronik als *Partitionierung* bezeichnet<sup>14</sup>. Durch eine voranschreitende Partitionierung erfolgt des Weiteren eine Konkretisierung der Schnittstellen zwischen domänen-heterogenen Systemelementen. Mechanische Funktionsumfänge werden systematisch mittels Wirkprinzipien weiter detailliert (siehe Wirkebene) oder direkt auf Bauebene Schritt für Schritt ausgestaltet. Elektrotechnische Funktionsumfänge können dagegen auf Funktionsebene mittels Blockschaltbildern weiter detailliert werden. In der Domäne der Informationstechnik werden die geplanten Software-Funktionen und die Softwarearchitektur üblicherweise in UML<sup>15</sup>-Diagrammen modelliert.

Zur weiteren Konkretisierung von Funktionen werden den abstrahierten Teilfunktionen anhand physikalisch-technischer Effekte Wirkprinzipien als prinzipielle Lösungsideen und Lösungskonzepte zugeordnet [Ponn & Lindemann 2011, S. 27]. Die Kombination der Wirkprinzipien zur Realisierung einer Teilfunktion bildet die Wirkstruktur, wobei unterschiedliche Variationen als Lösungsoptionen denkbar sind. Auf Wirkebene werden außerdem geometrische und stoffliche Merkmale bestimmt, indem Wirkort, -geometrie, -fläche, -bewegung und

---

<sup>14</sup> In englischsprachiger Literatur finden sich außerdem die Begriffe *technology allocation* und *domain allocation*.

<sup>15</sup> Unified Modeling Language (UML).

prinzipielle Werkstoffeigenschaften festgelegt werden [Czichos 2008, S. 54; Feldhusen *et al.* 2013a, S. 248-249]. Die entstehenden **Modelle auf Wirkebene** dienen vorwiegend als visuelles Kommunikationsmittel zwischen Entwicklern, um ein gemeinsames Verständnis für das Lösungskonzept zu schaffen. Weitere Modelle auf Wirkebene zielen darauf ab, die Ideengenerierung für mögliche Lösungen zu unterstützen. So können mit Hilfe eines morphologischen Kastens alternative Wirkprinzipien zuvor ermittelten Teilfunktionen zugeordnet werden.

Letztlich wird auf der **Baubene** die zur Herstellung notwendige konkrete Gestalt des Produkts festgelegt [Ponn & Lindemann 2011, S. 27]. Spätestens dabei werden Produktumfänge in disziplinspezifischen Modellen wie z. B. CAD-Geometriemodellen für die mechanische Konstruktion oder Schaltplänen in der Elektrotechnik abgebildet. Heutige CAD-Systeme arbeiten in der Regel mit einer parametrischen und featurebasierten Modellierung [Vajna *et al.* 2009, S. 184-197]. Entsprechende Geometriemodelle ermöglichen die Repräsentation von Konstruktionselementen und von (bauteilübergreifenden) Beziehungen zwischen diesen. Beispiele für solche Beziehungen sind Kontaktbedingungen oder voneinander abgegrenzte Bau-räume. In der Elektrotechnik werden Stromlaufpläne, Funktionspläne, Verdrahtungspläne und Lagepläne bzw. Layouts heute in der Regel ebenfalls digital auf Basis formaler Notationen (z. B. nach DIN 40900 bzw. IEC 617 und DIN 40719 bzw. IEC 750) erzeugt [Döring & Gierens 2009, S. 514]. In der Softwareentwicklung sind auf der UML basierende Komponenten- und Verteilungsdiagramme, Interaktions- und Sequenzdiagramme sowie Zustandsdiagramme zur Ausgestaltung (Spezifikation) der informationstechnischen Produktumfänge etabliert [Dumke 2003, S. 415].

### **Model-based Systems Engineering und SysML**

In den Anfängen der rechnerunterstützten Konstruktion stand zunächst die geometrische Ausgestaltung der mechanischen und elektrotechnischen Bestandteile eines Produkts im Vordergrund. Erst nach der Jahrtausendwende etablierten sich Softwaretools zur Unterstützung der Anforderungsmodellierung, Funktionsmodellierung und des Konzeptentwurfs [Chandrasegaran *et al.* 2013, S. 214; Kohn 2014, S. 64], die auf formalen Modellierungssprachen aufbauen. Heutige CAx-Systeme<sup>16</sup> ermöglichen die Erstellung von unterschiedlichen Produktmodellen, die jedoch größtenteils getrennt voneinander betrachtet werden müssen. Die damit erzeugten Produktmodelle stellen unterschiedliche Aspekte eines Produkts wie zum Beispiel eine Bauteilgeometrie oder ein Schaltplan dar und sind nicht zwangsläufig integrierbar. Auf eine durchgängig integrierte Betrachtung eines Produkts zielt das *Model-based Systems Engineering (MBSE)* ab.

Im Gegensatz zu einer dokumentenbasierten Entwicklung, in der verschiedene Produktmodelle in unabhängigen Papierdokumenten oder Dateien repräsentiert sind, greift die modellbasierte Entwicklung auf ein kohärentes Systemmodell zurück [Friedenthal *et al.* 2008, S. 15-17]. Dieses Systemmodell evolviert im Entwicklungsverlauf, das heißt es wird immer weiter detailliert bzw. angepasst. Das Systemmodell vereint die vier Sichtweisen Anforderungen, Struktur, Parametrik und Verhalten (Abbildung 3-1). Dafür werden für jede Sichtweise Teil-

---

<sup>16</sup> CAx: „Computer-Aided Everything“ – Beispiele sind CAD, CAE, CAID, CAO, CAT, CAPP, CAM, CAQ [Vajna *et al.* 2009, S. 1-12] aber auch CASE (Computer-Aided Software Engineering) [Dumke 2003, S. 9]

modelle erstellt und die darin enthaltenen Elemente wie Anforderungen, Funktionen und Komponenten miteinander verbunden [Friedenthal *et al.* 2008, S. 17-18]. Die Modellierung wird durch die *Systems Modeling Language (SysML)* ermöglicht. SysML ist eine graphische Modellierungssprache, die auf der UML aufbaut und die Analyse, Spezifikation, Gestaltung, Verifikation und Validierung komplexer Systeme unterstützt [Friedenthal *et al.* 2008, S. 29].

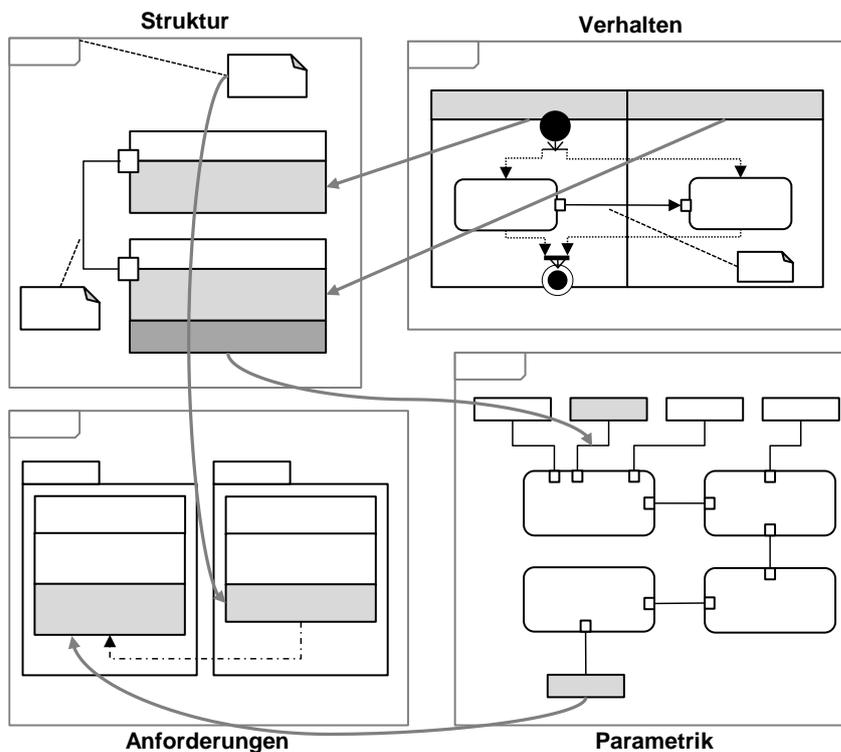


Abbildung 3-1 Beispielhafte Illustration der vier Perspektiven eines Systemmodells und ihre Verknüpfungen nach Friedenthal *et al.* [2008, S. 18, Figure 2.1].

Insgesamt sind neun Diagramme zur Modellierung eines Systems mit SysML vorgesehen (siehe Tabelle 3-2). Letztlich können also folgende Aspekte von Systemen, Komponenten und anderen Entitäten modelliert werden [Friedenthal *et al.* 2008, S. 29]:

- Strukturelle Komposition, Verbindungen und Klassifikation
- Funktionsbasiertes, nachrichtenbasiertes und zustandsbasiertes Verhalten
- Randbedingungen bezüglich physischer und leistungsbezogener Eigenschaften
- Beziehungen zwischen Verhalten, Struktur und Randbedingungen (z. B. Zuordnung von Komponenten zu Funktionen)
- Anforderungen und deren Relation zu anderen Anforderungen, Produktelementen und Testfällen

Tabelle 3-2 Diagrammtypen in SysML nach Friedenthal et al. [2008, S. 29-30].

| SysML-Diagramm                  | Erläuterung   |
|---------------------------------|---|
| <i>Requirements diagram</i>     | Repräsentiert textuelle Anforderungen, deren Beziehungen zueinander sowie zu Produktelementen und Testfällen. Dadurch wird die Nachvollziehbarkeit und Nachverfolgbarkeit (engl. <i>traceability</i> ) von Anforderungen unterstützt.   |
| <i>Activity diagram</i>         | Repräsentiert das Verhalten eines Systems basierend auf der Verfügbarkeit von Inputs, Outputs und Kontrollgrößen. Es gibt an, wie Aktionen/Prozesse des Systems Inputs in Outputs transformieren. Weit verbreitet sind hier sogenannte <i>Enhanced Functional Flow Block Diagrams (EFFBD)</i> . |
| <i>Sequence diagram</i>         | Repräsentiert das Verhalten bezüglich der Reihenfolge des Nachrichtenaustauschs zwischen Teilsystemen.  |
| <i>State machine diagram</i>    | Repräsentiert das Verhalten eines Systemelements bezüglich Zustandsveränderungen, die durch Ereignisse ausgelöst werden.  |
| <i>Use case diagram</i>         | Repräsentiert die Funktionsweise eines Systems in Bezug darauf, wie das System von externen Entitäten (z. B. Benutzern) verwendet wird.   |
| <i>Block definition diagram</i> | Repräsentiert Teilsysteme des Systems, die Blocks genannt werden, sowie deren Komposition und Klassifikation.   |
| <i>Internal block diagram</i>   | Repräsentiert die Relationen und Schnittstellen zwischen den Elementen eines Blocks.  |
| <i>Parametric diagram</i>       | Repräsentiert Randbedingungen für Eigenschaftswerte (z. B. $F = m * a$ ) zur Unterstützung von Analysen.  |
| <i>Package diagram</i>          | Repräsentiert die Ordnung eines Modells in Pakete, die bestimmte Modellelemente enthalten.  |

## Weitere Ansätze

Es wird kontinuierlich an der Weiterentwicklung und Erweiterung der Modellierung technischer Systeme geforscht. Für einen Überblick führender MBSE-Methodiken sei auf Estefan [2008] verwiesen. Beispielhaft seien zwei weitere Ansätze erwähnt, die jeweils die Systempartitionierung bezüglich beteiligter Domänen und bezüglich der räumlichen Anordnung der Systembestandteile adressieren. Während SysML mittels unterschiedlicher Diagrammtypen indirekt auch die Partitionierung mechatronischer Produkte abbilden kann, bietet sie keine explizite Unterscheidung von Komponenten unterschiedlicher Domänen. Um dies zu unterstützen, kann SysML spezifisch für die Modellierung mechatronischer Systeme angepasst werden. So zielt zum Beispiel *SysML4Mechatronics* darauf ab, die durchgängige Modellierung mechatronischer Systeme mit ihren domänenspezifischen Bestandteilen und Schnittstellen zu vereinfachen [Vogel-Heuser & Kernschmidt 2014, S. 38]. SysML sieht außerdem keine räumliche und **geometrische Systempartitionierung** vor. Daraufhin hat Jansen [2007, S. 82] einen integrierten Modellierungsansatz entwickelt, der die räumliche Anordnung von System- und Störelementen berücksichtigt und auf allen Abstraktionsebenen eingesetzt werden kann. Zur besseren Eingliederung in den Entwicklungsprozess werden in dem Modellierungsansatz zusätzlich Kontextelemente wie Anforderungen, Restriktionen, Ressourcen oder Entwicklungswissen modelliert [Jansen 2007, S. 90-97].

## Fazit

Die methodische Produktentwicklung sieht vor, dass ein Produkt auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen über den kompletten Entwicklungsverlauf modellhaft repräsentiert wird. Moderne Ansätze wie das Model-based Systems Engineering zielen auf eine durchgängige rechnerunterstützte Modellierung und Integration der Modelle ab. In den Modellen sind je nach Entwicklungsfortschritt üblicherweise folgende Informationen repräsentiert:

- **Produktanforderungen** samt Hierarchie und struktureller Zusammenhänge
- **Produktfunktionen** samt Hierarchie und struktureller Zusammenhänge
- Alternative **Wirkprinzipien** und Lösungskonzepte für Teilfunktionen
- **Produktkomponenten** samt Hierarchie und struktureller Zusammenhänge

Zu den Produktkomponenten werden hier nicht nur physische Bauteile sondern auch elektrotechnische bzw. regelungstechnische Elemente (Sensoren & Aktoren, Regelungs- bzw. Steuerungssoftware-Elemente) sowie Software-Komponenten gezählt. Physische Produktkomponenten können außerdem weiter in einzelne Konstruktionselemente und ihre geometrischen Beziehungen zueinander detailliert werden.

### 3.1.2 Organisationssystem

#### Klassische Organisationsmodelle

Das Organisationssystem in einem Entwicklungsprojekt wird durch alle am Projekt beteiligte und handelnde Akteure und deren Beziehungen zueinander gebildet. Üblicherweise wird das Organisationssystem in einem **Organigramm** modelliert, in dem die formal-hierarchischen Zusammenhänge (vgl. Kapitel 2.1.2) von Organisationseinheiten repräsentiert sind. Im Projektmanagement wird ein solches Organigramm für Projekte auch **Organizational Break-down Structure (OBS)** genannt, wobei darin die Abteilungs- und Teamhierarchie abgebildet ist und den Organisationseinheiten die Aktivitäten und Arbeitspakete aus dem Projektstrukturplan zugewiesen sind [PMI 2013, S. 261]. Zusätzlich ist es üblich die Zuteilung der am Projekt beteiligten Akteure für gewisse Aktivitäten und Arbeitspakete in einer sogenannten **Responsibility Assignment Matrix (RAM)** zu dokumentieren [PMI 2013, S. 262]. Häufig wird die Zuordnung darin nach den Kategorien *zuständig* (engl. *responsible*), *verantwortlich* (engl. *accountable*), *unterstützend* (engl. *consult*) und *informiert* (engl. *informed*) vorgenommen [PMI 2013, S. 262]. Die entstehende Matrix wird dann **RACI-Matrix** genannt.

Die Akteure im Organisationssystem können einerseits allgemeingültig auf Basis von Rollen und andererseits aus Ressourcensicht auf Basis konkreter Individuen betrachtet werden. Für Projekte sollten **Rollenbeschreibungen** erstellt werden, in denen Informationen über Verantwortlichkeiten, Befugnisse, Kompetenzen und Qualifikationen einer Rolle bzw. einer entsprechend zugeordneten Person dokumentiert werden [PMI 2013, S. 262].

Heutige Entwicklungsorganisationen stellen häufig ein Mehrliniensystem dar (vgl. Kapitel 2.2.1). Das heißt Organisationseinheiten sind sowohl in eine projektspezifische als auch in eine unternehmensübergreifende („Linie“) Organisationsstruktur eingebettet. In der Praxis lässt sich außerdem beobachten, dass die Einteilung in Abteilungen und Teams anhand der

**Fachdisziplinen** wie zum Beispiel Mechanik, Elektrik/Elektronik und Informationstechnik oder auch „divisional“ anhand von **Fachbereichen** wie zum Beispiel Werkzeugaufnahme, Schlagwerk, Getriebe, Motor, etc. vorgenommen wird. Letztlich basiert die Einteilung dabei auf der Gruppierung nach bestimmten Wissensbereichen bzw. **Expertisen**.

Organigramme, RACI-Matrizen und Rollenbeschreibungen sind in Unternehmen häufig mit Hilfe von Präsentationsprogrammen, Tabellenkalkulationsprogrammen oder Textverarbeitungsprogrammen erstellt. Die darin enthaltenen Informationen sind aber oft auch in ERP-Systemen<sup>17</sup> zur Personalverwaltung (Personalinformationssysteme) formal repräsentiert.

### **Ansätze zur Analyse von Organisationen**

Während die oben genannten Modelle vorwiegend zur Dokumentation und Visualisierung organisationaler Zusammenhänge für eine Unternehmung dienen, bestehen in der Literatur weitere Modellierungsansätze, die auf die Analyse von Organisationsstrukturen abzielen. Hier sei zunächst auf das gesamte Forschungsgebiet zur Untersuchung sozialer Netzwerke verwiesen (vgl. Borgatti *et al.* [2009]; Newman [2003, S. 174-176]; Wasserman & Faust [1994]). Aber auch in den Ingenieurwissenschaften werden Organisationsstrukturen modelliert, wobei hier meistens der Fokus auf Organisationseinheiten und deren Interaktionen im Kontext eines Entwicklungsvorhabens im Fokus stehen (vgl. Eppinger & Browning [2012, S. 79-84]). Mit Interaktionen sind primär Kommunikation, Informationsaustausch oder Informationsflüsse gemeint, wobei zwischen geplanter/erwünschter und tatsächlich stattfindender Interaktion unterschieden werden kann [Eppinger & Browning 2012, S. 84; Parraguez 2015, S. 64]. Der geplante Austausch basiert entweder auf Experteneinschätzungen oder auch auf indirekt abgeleiteten Zusammenhängen (vgl. Kapitel 3.3.1). Der tatsächlich stattfindende Informationsaustausch kann nur retrospektiv für einen bestimmten Zeitraum erfasst werden. Eppinger & Browning [2012, S. 84-87] stützen sich dafür auf Expertenbefragungen, entsprechende Zusammenhänge können jedoch auch aus vorhandenen Daten wie zum Beispiel E-Mail-Daten abgeleitet werden [Parraguez *et al.* 2015, S. 611].

Insgesamt ist die Modellierung der Interaktionen im Organisationssystem sehr stark an das Prozesssystem geknüpft, da sich Kommunikation und Informationsflüsse letztlich vor allem auf Aktivitätsebene äußern (vgl. Parraguez *et al.* [2015] und Kapitel 3.1.3).

### **Fazit**

Unternehmen verfügen in der Regel über Daten, die auf Elemente und Relationen innerhalb des Organisationssystems rückschließen lassen. In Bezug auf Entwicklungsprojekte sind hier insbesondere formale Abteilungs- und Teamstrukturen bis auf die Ebene von Rollen bzw. Personen relevant.

---

<sup>17</sup> Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme: Softwaresysteme zur Unterstützung unterschiedlicher unternehmerischer Aufgaben und damit verbundener Geschäftsprozesse, wie zum Beispiel das Personalwesen.

### 3.1.3 Prozesssystem

Bei einem Großteil der in der Literatur auffindbaren Prozessmodelle handelt es sich um Erklärungsmodelle, die auf die Erläuterung und Visualisierung des Entwicklungsablaufs abzielen (z. B. Münchner Vorgehensmodell, V-Modell, Spiralmodell). Sie bilden eine Referenz zur Orientierung für das Entwicklungsvorgehen und sind in Kapitel 2.2.2 thematisiert.

Die Darstellung dieser Modelle basiert dabei in der Regel auf keiner formalen Modellierungstechnik. Im Kontext dieser Arbeit stehen dagegen Prozessmodelle im Fokus, die einer formalen Modellierungssprache folgen und einen realen Ablauf instanziiieren. Browning & Ramasesh [2007] bieten dafür eine ausführliche Literaturrecherche über solche Prozessmodelle speziell im Kontext von Entwicklungsprojekten. Zusätzliche Auflistungen und Beschreibungen allgemeiner Prozessmodellierungsmethoden finden sich in Browning *et al.* [2006] und Browning [2009a].

Die Modellierung eines Prozesses als abstraktes Phänomen stellt dabei eine grundlegende Herausforderung dar. Das Produktsystem und Organisationssystem mit seinen direkt beobachtbaren Elementen (z. B. Komponenten, Personen) und quantifizierbaren Relationen lassen sich im Gegensatz zum Prozesssystem leichter modellieren [Parraguez 2015, S. 105-106]. Das spiegelt sich auch in der Vielfalt wider, in der Begriffe zur Beschreibung von Prozessen verwendet werden und in der Prozesse letztlich modelliert werden.

#### Begriffsabgrenzung

Die Unterscheidung der Begriffe Prozess (engl. *process*), Aktivität (engl. *activity*), Aufgabe (engl. *task*) und Arbeit (engl. *work*) ist nicht immer eindeutig und die Begriffe werden teils synonym und teils sogar widersprüchlich definiert. Das mag auch daran liegen, dass die Übersetzung zwischen Englisch und Deutsch nicht immer eindeutig ist (vgl. Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3 Beispielhafte Gegenüberstellung der Definitionen prozessbezogener Begriffe in einem deutschen und englischen Online-Wörterbuch.

| Begriff                       | Wiktionary <sup>18</sup>   | Merriam-Webster Dictionary <sup>19</sup>   |
|-------------------------------|--|--|
| Prozess ( <i>process</i> )    | „Eine durch ein Ereignis ausgelöste Folge von Aktivitäten oder Zuständen, die in einen Endzustand mündet.“                                       | “A series of actions that produce something or lead to a particular result.”     |
| Aktivität ( <i>activity</i> ) | „Kleinste Ausführungseinheit in einem Arbeitsablauf, dem [...] ausführende Ressourcen [...] und zeitliche Abhängigkeiten [...] zugeordnet sind.“ | ”Something that is done as work or for particular purpose.“                      |
| Arbeit ( <i>work</i> )        | „Ausführende, zweckgerichtete Tätigkeit.“  | “Activity in which one exerts strength or faculties to do or perform something.” |
| Aufgabe ( <i>task</i> )       | „Etwas, das zu erledigen ist; Arbeitsauftrag“  | “A usually assigned piece of work often to be finished within a certain time.”   |

<sup>18</sup> <https://de.wiktionary.org/wiki/Wiktionary:Hauptseite>, zuletzt aufgerufen am 26.10.2016.

<sup>19</sup> <http://www.merriam-webster.com/dictionary/>, zuletzt aufgerufen am 26.10.2016.

Abbildung 3-2 veranschaulicht das Begriffsverständnis in dieser Arbeit. Den Kern eines Prozesses machen seine beinhaltenden Aktivitäten aus, die Ergebnisse erzeugen (vgl. Definition in Kapitel 2.2.1). Die Ergebnisobjekte, die wiederum auch Input für nachfolgende Aktivitäten sein können, werden dabei nicht immer als inhärenter Teil eines Prozesses verstanden, sondern als „Ergebnis des Prozesses“. Eine Aktivität kann als Kombination einzelner Aktionen gesehen werden. Eine Aktion beschreibt also eine einzelne Tätigkeit innerhalb einer Aktivität. Die Erzeugung von Ergebnissen kann als Arbeit bezeichnet werden, die in einzelne Arbeitspakete aufgeteilt werden kann. Parraguez [2015, S. 50-51] definiert eine Entwicklungsaufgabe als die Arbeit, die zur Erreichung eines bestimmten Entwicklungsziels notwendig ist bzw. spezifiziert wurde. Eine Aufgabe ist also instanziierte Arbeit mit Zielbezug, die üblicherweise einer Person zugewiesen und zeitlich begrenzt ist. Die Begriffe Prozess bzw. Prozessschritt stellen Überbegriffe dar, die verwendet werden, um allgemein auf das zugrunde liegende abstrakte Phänomen zu referenzieren.

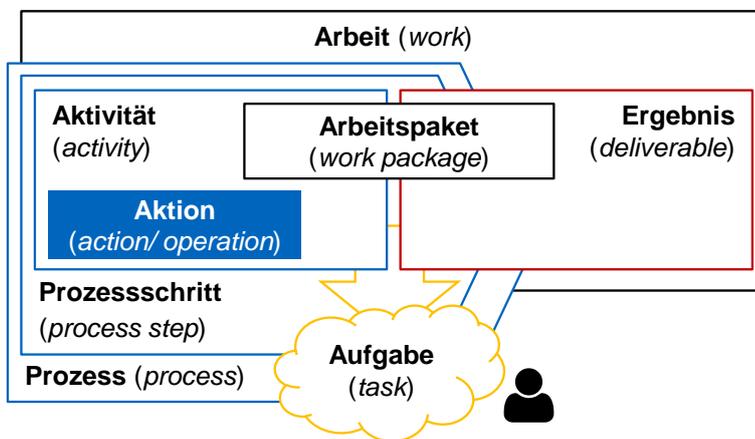


Abbildung 3-2 Zusammenhänge der verwendeten Begriffe zur Beschreibung von Prozessen.

## Grundlegende Ansätze zur Modellierung von Prozessen

Die Mehrheit formaler Modellierungsansätze erzeugen graphenbasierte Repräsentationen (vgl. Kapitel 2.4.3) eines Prozesses, die in der Prozessliteratur auch als Netzwerk-Modelle bezeichnet werden. Sie stellen primär die Präzedenz (vgl. *Precedence Diagramming Method*, PMI [2013, S. 156]), das heißt logische Relationen zwischen Aktivitäten eines Prozesses mittels Knoten und Kanten dar, wobei die Aktivitäten üblicherweise als Knoten und die Relationen als Kanten repräsentiert werden [PMI 2013, S. 156-157].

Ein grundlegender graphenbasierter Modellierungsansatz zur Beschreibung von Prozessen ist die *Structured Analysis and Design Technique (SADT)* [Ross 1977]. Nach SADT werden Aktivitäten als Knoten repräsentiert und neben Inputs und Outputs auch Kontrollgrößen und Mechanismen (Werkzeuge, Methoden) als Kanten modelliert [Lindemann 2009, S. 16; Ross 1985, S. 26]. In sogenannten **SIPOC-Diagrammen** (Supplier – Input – Process – Output – Customer) werden ebenfalls Inputs, Prozessschritte und Outputs modelliert, wobei diese nicht graphenbasiert repräsentiert, sondern in einer Tabelle aufgelistet werden. Zwei zusätzliche

Spalten spezifizieren die Anbieter der Inputs und die Empfänger der Outputs [Browning 2009a, S. 82].

Mit dem Ziel Modellierungsansätze zu standardisieren, wurde basierend auf SADT der IDEF0-Modellierungsstandard entwickelt. **IDEF0** adressiert die Modellierung von Produkt- oder Unternehmensfunktionen mittels Aktivitäten bzw. Prozessen mit Fokus auf Relationen und benötigte Daten [NIST 1993, i]. Eine weitere Variante namens **IDEF3** zielt vor allem auf die Beschreibung von Prozessen mittels zwei unterschiedlicher Modellierungsstrategien ab und ermöglicht mehrere Ansichten. Dafür liegt der Fokus der Modellierung auf logischen Prozessoperatoren wie UND-/ODER-Verknüpfungen [Browning 2009a; Mayer *et al.* 1995].

Ein weiterer grundlegender Modellierungsansatz sind die **Ereignisgesteuerten Prozessketten (EPK)**, in denen ein Prozess als alternierende Kombination von Ereignissen und Funktionen (Aktivitäten) repräsentiert wird, die durch logische Prozessoperatoren miteinander verknüpft sind [Keller *et al.* 1992]. Aufbauend auf mehreren Prozessmodellierungsansätzen wie SADT bzw. den IDEF-Notationen und EPK hat die Object Management Group (OMG) einen Standard namens **Business Process Model and Notation (BPMN)** entwickelt [OMG 2011], der heutzutage weit verbreitet ist. Tabelle 3-4 gibt einen Überblick über Elemente, die mit dieser Modellierungssprache formal repräsentiert werden können.

Tabelle 3-4 Basiselemente der BPMN [OMG 2011, S. 27-28].

| Elementkategorie   | Elemente          |
|--------------------|-------------------|
| Flow Objects       | Events            |
|                    | Activities        |
|                    | Gateways          |
| Data               | Data Objects      |
|                    | Data Inputs       |
|                    | Data Outputs      |
|                    | Data Stores       |
| Connecting Objects | Sequence Flows    |
|                    | Message Flows     |
|                    | Associations      |
|                    | Data Associations |
| Swimlanes          | Pools             |
|                    | Lanes             |

Die vorangehend beschriebenen, grundlegenden Ansätze dienen primär zur Visualisierung und Dokumentation von Prozessen, wobei BPMN bereits ermöglicht auch ausführbare Prozessmodelle (*Workflows*) zu erstellen. Im Folgenden werden Modellierungsansätze vorgestellt, die explizit zur analytischen Betrachtung von Prozessen gedacht sind.

## Ansätze zur Analyse und für das Management von Prozessen

Eine wichtige Gruppe von Ansätzen zur analytischen Betrachtung von Prozessen dient zur Terminplanung. Für die Terminplanung werden Aktivitätsnetzwerke mit Zusatzinformationen (z. B. nominaler Arbeitsaufwand oder benötigte materielle/ personelle Ressourcen) für jede Aktivität benötigt. Die bekannteste Methode zur Terminplanung ist die **Kritische-Pfad-Methode** (engl. *critical path method*, CPM), die anhand der Prozesslogik und den Aktivitätsdauern (nominale Arbeitsaufwände) den kritischen Pfad im Aktivitätsnetzwerk identifiziert [PMI 2013, S. 176-177]. Die **Program Evaluation and Review Technique (PERT)** nutzt eine ähnliche Modellierung, wobei die Aktivitätsdauer nicht als deterministisch gesehen wird, sondern stattdessen eine Beta-Verteilung (ein gewichtetes Mittel aus erwarteter, optimistischer und pessimistischer Dauer) für eine Analyse des Aktivitätsnetzwerks angenommen wird [O'Donovan 2004, S. 52; PMI 2013, S. 170-171]. Eine zusätzliche Erweiterung wird **Graphical Evaluation and Review Technique (GERT)** genannt, in der das Aktivitätsnetzwerk als stochastisches Netzwerk modelliert wird (d. h. Aktivitäten sind mit einer Auftrittswahrscheinlichkeit versehen). Außerdem sind in dieser Modellierung Verzweigungen mittels UND-/ODER-Beziehungen vorgesehen [Pritsker 1966]. Schließlich seien hier noch die sogenannten **Petri-Netze** erwähnt, in denen zusätzlich zu den Aktivitäten die Inputs und Outputs als Knoten dargestellt werden [O'Donovan 2004, S. 42].

Neben Aktivitätsnetzwerken im Projektmanagement häufig eingesetzte Repräsentationsformen für Terminpläne (als Sonderform von Prozessmodellen) sind **Balkendiagramme** (auch bekannt als Gantt-Diagramme) und **Meilensteindiagramme**. Meilensteindiagramme geben einen groben Überblick über den zeitlichen Verlauf im Projekt und stellen nur Start- und Endtermine zur Erstellung der Hauptergebnisse sowie wichtige externe Schnittstellen dar. In Balkendiagrammen ist jede Aktivität in einer Zeile aufgelistet und entsprechende Balken geben auf einer horizontalen Zeitleiste Start- und Endzeitpunkt an. Auf Basis eines Balkendiagramms kann auch ein sogenanntes **Workload-Diagramm** erstellt werden, indem der Arbeitsaufwand zur Durchführung der Aktivitäten kumuliert über die Zeit aufgetragen wird (z. B. Lang & Madnick [1993, S. 19]).

Browning [2009a] versteht die unterschiedlichen Modellierungsansätze als mögliche Ansichten (engl. *views*) auf einen Prozess und kondensiert die darin dargestellten Aspekte in einem **Process Architecture Framework (PAF)**. Das PAF sieht lediglich die Modellierung von Aktivitäten und Arbeitsergebnissen als miteinander verbundene Knoten vor. Weitere Daten über den Prozess werden als Attribute repräsentiert (Abbildung 3-3).

Eppinger & Browning [2012, S. 130] modellieren Aktivitäten und ihre Interaktionen (eine Aktivität benötigt Informationen, die von einer anderen Aktivität erzeugt werden) matrixbasiert in einer sogenannten **Prozess-DSM**. Mittels Triangularisierung einer Prozess-DSM kann dann die Prozessreihenfolge dahingehend geplant werden, dass es möglichst wenig und möglichst kurze Rücksprünge im Prozess gibt.

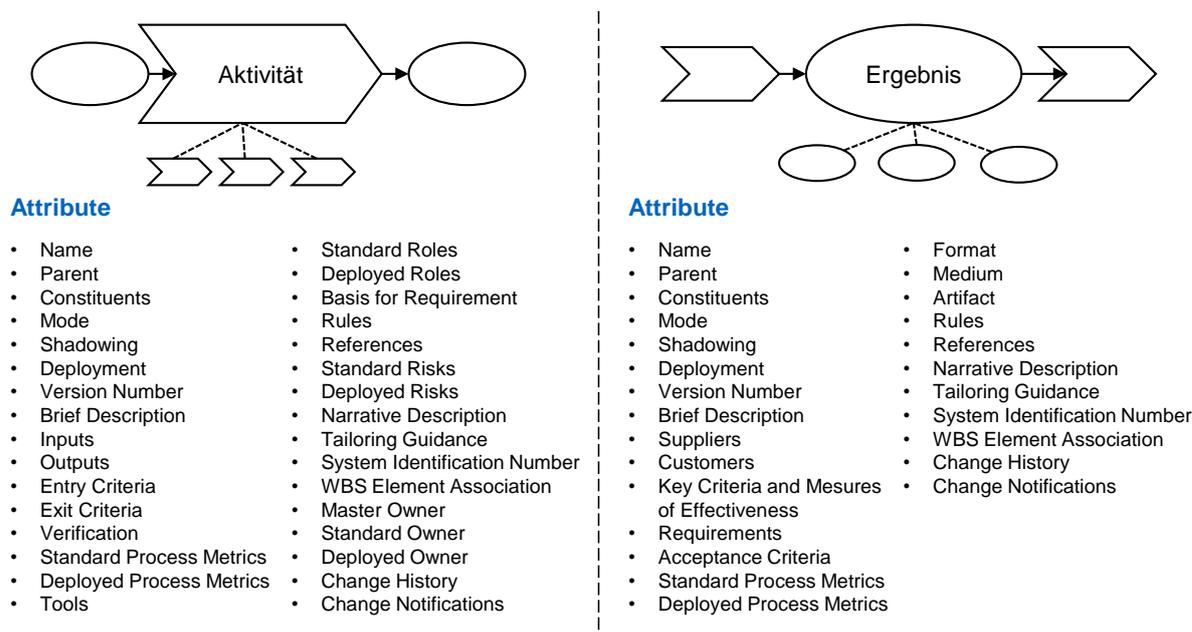


Abbildung 3-3 Objekte und Attribute des Process Architecture Frameworks nach Browning et al. [2006, S. 122]; Browning [2009a, S. 82], Table VI.

### Betrachtung von Abhängigkeiten zwischen Aktivitäten

Die oben genannten Modellierungsansätze fokussieren in der Regel auf die Prozessschritte und deren Informationsabhängigkeiten. Browning *et al.* [2006, S. 109] kritisieren, dass dabei gerade genug Verbindungen zwischen den Prozessschritten berücksichtigt werden, damit alle Boxen miteinander verbunden sind. Details darüber, wie Information zwischen zwei Aktivitäten übertragen wird, bleiben außerdem unberücksichtigt [Parraguez 2015, S. 56]. Deshalb wird im Folgenden näher beleuchtet, wie Abhängigkeiten auf Prozessebene in der Literatur betrachtet werden.

Im Projektmanagement spielt zur Abhängigkeitsbetrachtung die **Precedence Diagramming Method** eine wichtige Rolle, mit deren Hilfe die logische Reihenfolge der Aktivitäten (Prozesslogik) in einem Aktivitätsnetzwerk modelliert werden kann [PMI 2013, S. 156]. Die Methode unterscheidet vier verschiedene logische Beziehungen zwischen Aktivitäten:

- **Ende-zu-Start** (engl. *Finish-to-Start*, FS): Die nachfolgende Aktivität kann erst starten, wenn die Vorgängeraktivität abgeschlossen ist. Dies ist die am häufigsten verwendete Beziehung. Sie entspricht einer strikten **Output-Input-Beziehung** (Nachfolgeaktivität benötigt ein Ergebnis der Vorgängeraktivität als Input).
- **Ende-zu-Ende** (engl. *Finish-to-Finish*, FF): Die nachfolgende Aktivität kann erst enden, wenn die Vorgängeraktivität abgeschlossen ist.
- **Start-zu-Start** (engl. *Start-to-Start*, SS): Die nachfolgende Aktivität kann erst starten, nachdem die Vorgängeraktivität gestartet wurde.

- **Start-zu-Ende** (engl. *Start-to-Finish*, SF): Die Nachfolgende Aktivität kann erst enden, sobald die Vorgängeraktivität gestartet wurde.

Beziehungen können entweder obligatorisch sein, oder lediglich eine präferierte Logik abbilden. Außerdem können interne Beziehungen von externen Beziehungen (Abhängigkeiten zu Prozessen außerhalb des Projekts) unterschieden werden. Im Projektmanagement wird darüber hinaus vorgesehen, dass zur Detaillierung der Beziehungen Vorlaufzeiten (engl. *leads*) und Verzögerungen (engl. *lags*) angegeben werden können. Eine FS-Beziehung mit zwei Wochen Vorlaufzeit gibt an, dass die Nachfolgeaktivität zwei Wochen vor Ende der Vorgängeraktivität starten kann. Zwei Wochen Verzögerung bedeuten dagegen, dass die nachfolgende Aktivität erst entsprechend verzögert zur Vorgängeraktivität starten kann (angegeben als Start-to-Start-Beziehung mit zwei Wochen Verzögerung). Diese Angaben sind wichtig für die Terminplanung. Die *Precedence Diagramming Method* geht davon aus, dass die Beziehung zwischen zwei Aktivitäten diskret bzw. unmittelbar ist. Aktivitäten können jedoch auch gegenseitig voneinander abhängig sein [Eppinger & Browning 2012, S. 133-134], was zu einem kontinuierlichen Informationsaustausch führt. Für Betrachtungen, die eine genauere Untersuchung des Informationsflusses ermöglichen, sei auf die Arbeit von Christian [1995] oder Yang *et al.* [2014, S. 161-162] verwiesen.

## Fazit

Entwicklungsprozesse können aufgrund der Vielzahl von Abhängigkeiten als komplex bzw. als komplexes System bezeichnet werden [Kreimeyer & Lindemann 2011, S. 39; Lindemann 2009, S. 8]. Es existieren viele verschiedene Ansätze zur Prozessmodellierung, die eine Analyse des Prozesssystems ermöglichen. Insgesamt lässt sich festhalten, dass ein überproportionaler Anteil der Prozessmodellierungsmethoden auf die Aktionen anstatt der Interaktionen fokussiert, obwohl die Interaktionen einen großen Einfluss auf die Leistung eines Entwicklungsprozesses haben und deshalb mehr Aufmerksamkeit verdient hätten [Browning & Ramasesh 2007, S. 234]. Für das weitere Verständnis notwendiger Interaktionen ist es wichtig, die Zusammenhänge innerhalb eines Projekts zu betrachten. Dafür werden im Folgenden Modellierungsansätze aufgezeigt, in denen Produktsystem, Prozesssystem und Organisationssystem miteinander verknüpft werden. Anschließend wird das Thema Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten in Kapitel 3.2 weiter vertieft.

### 3.1.4 Integrative Betrachtung von Produkt, Prozess und Organisation

Mit Blick auf die Teilsysteme eines Entwicklungsprojekts (vgl. Kapitel 2.1.1) schlagen Prozesse die Brücke zwischen Organisations- und Produktsystem. Prozessmodelle werden trotzdem häufig dafür kritisiert, die Relationen zu anderen Entitäten und Bereichen zu stark zu vernachlässigen [Gericke & Blessing 2012, S. 8-9]. Obwohl es als hilfreich und notwendig angesehen wird, werden die Informationen aus den unterschiedlichen Systemen selten in einem integrierten Modell kombiniert [Browning *et al.* 2006, S. 108]. Trotzdem beinhalten die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Modellierungsansätze teilweise bereits Aspekte aus jeweils anderen Systemen. Zum Beispiel verkörpern die in einem Prozessmodell angegebenen Outputs von Entwicklungsaktivitäten Artefakte des Produktsystems und Ressource

Assignment Matrizen (RAM's) stellen eine Verknüpfung von Organisationssystem und Prozesssystem dar.

In der industriellen Praxis existiert jedoch selten ein alleinstehendes Modell, das alle Sichtweisen eines Projekts integriert („Single Source of Truth“). Die Modelle werden in der Regel aufgrund der großen Informationsmenge und dem dafür notwendigen Aufwand nicht integriert [O'Donovan *et al.* 2005, S. 70]. Außerdem hindern unterschiedliche Formate, Zwecke und Verfügbarkeit bzw. Zugriffsmöglichkeiten die Integration. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass die Modelle in der Praxis größtenteils aufeinander abgestimmt sind, weil unterschiedliche Personen mit mehreren Modellen gleichzeitig zu tun haben und diese so automatisch auf Kongruenz prüfen [O'Donovan *et al.* 2005, S. 70].

In der Literatur lassen sich dagegen vereinzelt Ansätze identifizieren, die explizit auf eine komplett integrierte Modellierung des Produkt-, Prozess- und Organisationssystems abzielen. Der Prozess als Bindeglied zwischen dem Produktsystem und dem Organisationssystem [vgl. auch Göpfert 2009, S. 157] steht dabei häufig im Mittelpunkt. In Abbildung 3-4 sind formale Modellierungsansätze und Modelle aufgezeigt, die Aspekte aus jeweils zwei oder aus allen drei Teilsystemen beinhalten<sup>20</sup>. Sie werden nachfolgend vorgestellt.

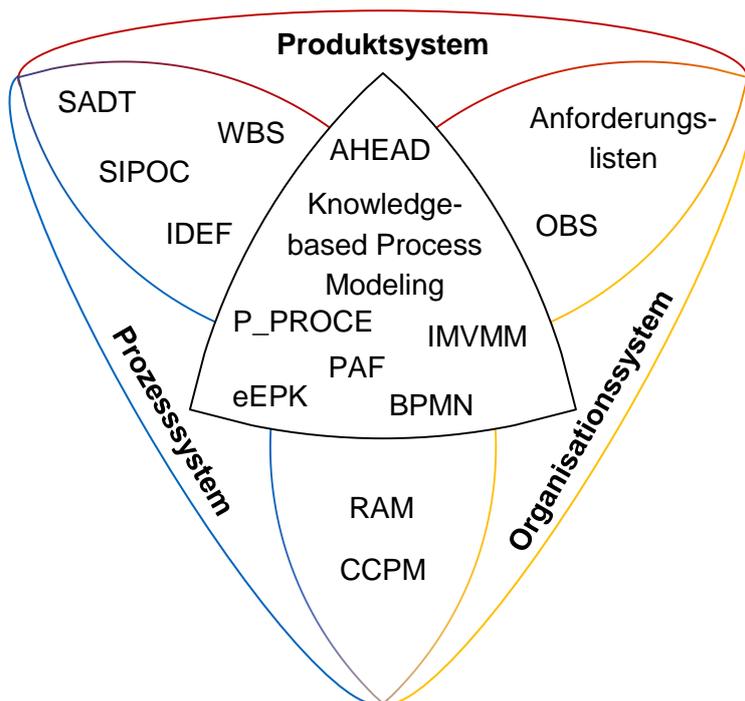


Abbildung 3-4 Identifizierte integrative Modellierungsansätze bzw. Modelle für Projektsysteme.

<sup>20</sup> Modelle, die im Rahmen von Methoden zur strukturellen Analyse erzeugt werden (z. B. eine Prozess-Produkt-DSM) sind hier ausgenommen und werden in Kapitel 3.3 adressiert.

### **Integration von Produkt und Prozess**

Im Rahmen der Literaturrecherchen können keine Modellierungsansätze identifiziert werden, die explizit zur integrativen Modellierung des Produkt- und Prozesssystems gedacht sind. Die Prozessmodellierungstechniken SADT, SIPOC und IDEF (IDEF0 bzw. IDEF3) beinhalten jedoch indirekt Informationen über das Produktsystem, weil sich die darin spezifizierten Inputs und Outputs auf das Produktsystem beziehen. Lauer [2010, S. 6-7] argumentiert, dass sich die in solchen Modellen modellierten Dokumente (als Repräsentation des Produktsystems) nur mit statischen Prozessen verknüpfen lassen, Entwicklungsprozesse sich jedoch dynamisch entfalten. Er präsentiert dahingehend eine Methode zur integrativen Dokumenten- und Prozessbeschreibung, die eine halbautomatische Verknüpfung zwischen Entwicklungsdokumenten und dynamischen Entwicklungsprozessen ermöglicht. Schließlich werden im Projektmanagement die Projektziele bzw. -umfänge in einer Work Breakdown Structure (WBS) bis auf einzelne Arbeitspakete herunter gebrochen. Aus diesen werden indirekt die durchzuführenden Aktivitäten abgeleitet und dadurch ein Zusammenhang zwischen Produkt und Prozess abgebildet.

### **Integration von Produkt und Organisation**

Auch das Produktsystem und das Organisationssystem werden nicht explizit in Modellen integriert betrachtet. In einer Anforderungsliste sollte aber jeder Anforderung ein Verantwortlicher zugeordnet sein [Ponn & Lindemann 2011, S. 46], was zumindest eine Verknüpfung der beiden Systeme bedeutet. In der Organizational Breakdown Structure (OBS) werden den Organisationseinheiten Arbeitspakete aus der WBS zugeordnet, was ebenfalls einer Verknüpfung der beiden Systeme entspricht [PMI 2013, S. 261].

### **Integration von Prozess und Organisation**

In einer Responsibility Assignment Matrix (RAM) werden in der Projektplanung das Prozess- und Organisationssystem miteinander verknüpft. Eine Zuordnung von Organisationseinheiten auf Prozesse wird auch in der im fortschrittlichen Projektmanagement geläufigen Methodik *Critical Chain Project Management (CCPM)* nach Goldratt [1997] genutzt, um begrenzte Arbeitskapazitäten bei der Zeitplanung zu berücksichtigen.

### **Integration von Produkt, Organisation und Prozess**

Die Kombination der klassischen Projektmanagementmodelle WBS, OBS und RAM ermöglicht eine integrierte Betrachtung des Projektsystems. Standard Projektmanagement-Tools wie zum Beispiel Microsoft Project greifen zur Erstellung dieser Partialmodelle bereits auf eine integrierte Datenbasis zurück, unterstützen jedoch die umfassende Berücksichtigung des Produktsystems über eine WBS hinaus nur unzureichend.

Eine detailliertere Modellierung und damit eine tiefere Integration wird durch die Verwendung der Prozessmodellierungsansätze erweiterte Ereignisgesteuerte Prozessketten (eEPK) [Scheer 2000] oder Business Process Model and Notation (BPMN) möglich, in denen sowohl Datenobjekte (Entwicklungsartefakte) als auch Organisationseinheiten mit Prozesselementen verknüpft werden können. Etablierte Geschäftsprozessmanagement-Tools (z. B. die ARIS

Plattform der Software AG<sup>21</sup>, Stages von Method Park<sup>22</sup> oder auch SAP-Lösungen<sup>23</sup>) repräsentieren die modellierten Elemente ebenfalls in einer integrierten Datenbasis.

Das *Process Architecture Framework (PAF)* ist eine weitere Grundlage für die Prozessmodellierung, in der auch Produkt- und Organisationsinformationen vorgesehen sind. Die Informationen werden darin in Form von Attributen repräsentiert.

In der Literatur finden sich außerdem konkrete Forschungsbemühungen, die auf eine integrierte Modellierung von Produkt, Prozess und Organisation im Rahmen der Produktentwicklung abzielen. Zhang *et al.* [1999, S. 1390] präsentieren die Idee einer *Integrated Multi-View Modeling Methodology (IMVMM)* als System-Modellierungsansatz, mit dem Produktinformationen, Entwicklungsaktivitäten, Unternehmensressourcen und die Organisationsstruktur integriert modelliert werden können. Ein ähnlicher Ansatz namens *Knowledge-based Process Modeling* stammt von Zhong *et al.* [2004], in dem neben Organisations-, Produktinformations-, Ressourcen- und Aktivitätsmodellen auch ein Wissensmodell (basierend auf historischen Daten und Wissen) vorgesehen ist. Beide Ansätze zielen insbesondere auf eine Simulation der modellierten Projekte ab.

Qian & Shensheng [2002] kombinieren im sogenannten P\_PROCE Modell (Abbildung 3-5, links) die Prozesssicht (P), die Produktsicht (P), die Ressourcensicht (R), die Organisationsicht (O) und eine Kontroll- und Evaluationsicht (CE). Darauf aufbauend stellen sie die informationstechnische Umsetzung eines Management-Systems für Produktentwicklungsprozesse vor, das die Funktionalität eines PDM-Systems und eines Workflow Management-Systems integriert.

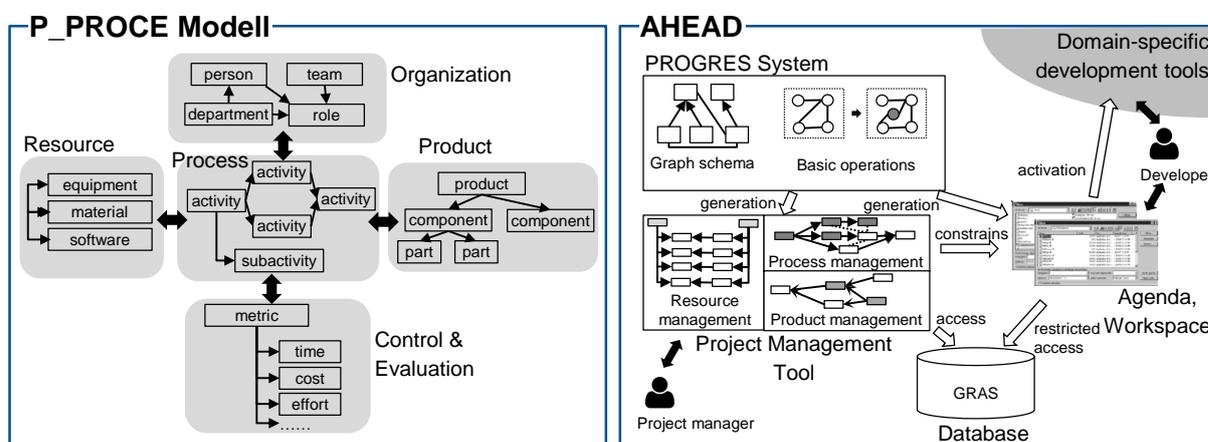


Abbildung 3-5 Illustration der Ansätze zum integrierten Management von Projektdaten P\_PROCE nach Qian & Shensheng [2002, S. 205, Figure 2] und AHEAD nach Krapp *et al.* [2000, S. 456, Fig. 1].

<sup>21</sup> [www.softwareag.com/de/products/aris\\_alfabet/bpa/default.asp](http://www.softwareag.com/de/products/aris_alfabet/bpa/default.asp), zuletzt aufgerufen am 30.10.2016

<sup>22</sup> <http://stages.methodpark.de/>, zuletzt aufgerufen am 30.10.2016

<sup>23</sup> <http://go.sap.com/germany/solution.html>, zuletzt aufgerufen am 30.10.2016

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 476 „IMROVE“ an der RWTH Aachen wurde das AHEAD-System (*Adaptable and Human-centered Environment for the Administration of Development Processes*; Abbildung 3-5, rechts) entwickelt [Heller *et al.* 2008; Jäger *et al.* 2000; Krapp *et al.* 2000; Westfechtel 2001]. Das AHEAD-System zielt auf das Management und die Modellierung von Entwicklungsprozessen ab und ermöglicht eine integrierte Betrachtung von Produkten (Dokumentationen von Anforderungen, Softwarearchitektur, oder umgesetzte Module), Aktivitäten (Entwicklungsaufgaben), und Ressourcen (Entwicklungsaufgaben erfüllende Personen; Werkzeuge, die diese unterstützen) sowohl für das Management als auch für Entwicklerinnen und Entwickler [Jäger *et al.* 2000, S. 325-326]. Es kombiniert dafür die drei Teilmodelle *CoMa* (Configuration Management) für Produktinformationen, *DYNAMITE* (evolvierende Aufgabennetzwerke) für Prozessinformationen und *RESMOD* (REsource Management MODel) für Informationen bezüglich Human- und Computerressourcen [Jäger *et al.* 2000, S. 327]. Intern (d. h. informationstechnisch) werden die Modelle in komplexen Graph-Strukturen wie Versions-, Konfigurations-, Aufgaben- und Ressourcengraphen repräsentiert und in einer integrierten Datenbank (GRAS) gespeichert. Die Graph-Instanzen eines Entwicklungsprojekts können auf Arbeitsebene für selbst definierbare Analysen eingespeist werden (für Projektmanagerinnen bzw. -manager) oder in eigens spezifizierten Ansichten visualisiert werden (für Projektmanagerinnen bzw. -manager und Entwicklerinnen bzw. Entwickler) [Jäger *et al.* 2000, S. 329].

## Fazit

Der Entwicklungsprozess stellt das Bindeglied zwischen der entwickelnden Organisation und dem zu entwickelnden Produkt dar. In diversen Prozessmodellierungsansätzen sind deshalb auch Aspekte des Produkt- und Organisationssystems enthalten. Durch die Kombination mehrerer Partialmodelle ist es theoretisch denkbar ein integriertes Gesamtmodell eines Entwicklungsprojekts zu erhalten. Kommerzielle Prozessmanagement-Software beweist indes, dass es möglich ist für das Projektsystem ein integriertes Datenmodell zu verwenden („*Single source of truth*“) und daraus die unterschiedlichen Sichtweisen als Partialmodelle auszuleiten.

Der Integrationsgrad bezüglich des Produktsystems ist dabei jedoch noch relativ gering. Es hat sich nach derzeitigem Kenntnisstand kein Tool etabliert, das die in einem PDM-System verfügbaren Produktdaten konsequent mit den üblicherweise im Projektmanagement betrachteten Prozess- und Organisationsdaten verknüpft. Eine solche Integration war bereits Gegenstand einzelner Forschungsbemühungen, die sich insbesondere mit der informationstechnischen Umsetzung eines integrierten Managementsystems für Projektdaten beschäftigt haben. Am vielversprechendsten erscheint hier das Konzept des an der RWTH Aachen entwickelten AHEAD-Systems. Die Projektdaten werden intern in Form von attribuierten, typisierten Graphen repräsentiert, wobei eine anwendungsspezifische Anpassung der zugrunde liegenden Metamodelle an vorhandene Datenstrukturen in einem Unternehmen ermöglicht wird. Mit Hilfe von ebenfalls anpassbaren Regeln zur Graphentransformation können Analysen durchgeführt werden und individuelle Datenvisualisierungen (z. B. Zeitpläne für einzelne Entwicklerinnen und Entwickler) erzeugt werden.

## 3.2 Umgang mit Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten

Die zunehmende Komplexität von Produkten, Prozessen und Organisationen beruht zu großen Teilen auf der steigenden Anzahl und Vielfältigkeit der Abhängigkeiten innerhalb dieser Systeme. Von Projektmanagerinnen bzw. -managern wird erwartet, dass sie diese Abhängigkeiten zur Planung und Steuerung ihrer Projekte zu berücksichtigen. Traditionelle Projektmanagementtheorie und -literatur schenken dem Phänomen Abhängigkeiten jedoch wenig Aufmerksamkeit (vgl. Kapitel 2.3). Typischerweise werden dabei lediglich Abhängigkeiten auf Prozessebene betrachtet [Worren 2012, S. 201]. Diese werden in der Regel als reine Sequenz interpretiert, nach der eine Vorgängeraktivität Input für eine Nachfolgeraktivität erzeugt (vgl. z. B. Kritische-Pfad-Methode, EPK-Modellierung, Netzplantechnik/PERT). Stattdessen sollten Abhängigkeiten umfassender als ein **Bedarf für Interaktion** verstanden werden [Moser *et al.* 2015, S. 6]. Diese Interaktion (im Folgenden auch als Abstimmung bezeichnet) wird durch Koordination der beteiligten Prozessschritte und Akteure erzielt. Um das Projektmanagement in komplexen Entwicklungsprojekten bei der Planung dieser Koordination zu unterstützen, ist es deshalb wichtig das Wesen von **Abhängigkeiten als Ursache für Koordinationsbedarfe** detaillierter zu erfassen.

Moser *et al.* [2015, S. 7-8] präsentieren ein Erklärungsmodell, um die Mechanismen der Abhängigkeit detaillierter zu beschreiben (Abbildung 3-6). Ausgangspunkt sind darin verschiedene Ursachen, die zu Bedarfen für Interaktion führen. Bevor die Bedarfe durch Interaktion von Akteuren im Prozess berücksichtigt bzw. gedeckt werden können, müssen sie bewusst adressiert werden. Je nach Erfolg der Interaktion zur Berücksichtigung der Abhängigkeit stellen sich lokale Effekte ein, die wiederum ins Gesamtsystem propagieren können und entsprechend selbst wieder Ursache für Abstimmungsbedarfe sein können.

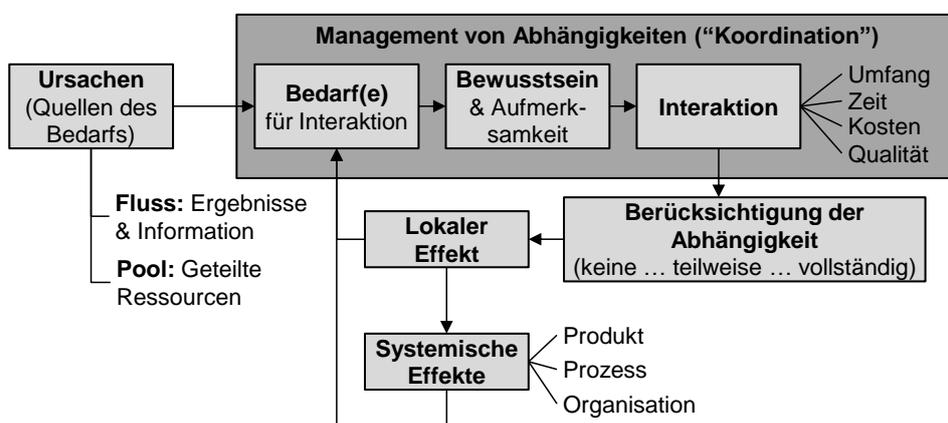


Abbildung 3-6 Mechanismen der Abhängigkeit von Ursachen bis Auswirkungen nach Moser *et al.* [2015, S. 8, Figure 3, freie Übersetzung des Autors aus dem Englischen].

Die folgenden Unterkapitel beleuchten weitere Aspekte der Koordinationsplanung. Zunächst werden Abhängigkeiten basierend auf vorhandener Literatur charakterisiert (Kapitel 3.2.1). Der Umgang mit Abhängigkeiten wird schließlich auf zwei Ebenen betrachtet. Die eigentliche Koordination findet auf einer lokalen Ebene statt (Kapitel 3.2.2). Auf einer übergeordneten, globalen Ebene kann von Synchronisation gesprochen werden (Kapitel 3.2.3).

### 3.2.1 Charakterisierung von Abhängigkeiten

#### Begriffsdefinition

Literaturquellen, die sich mit Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten beschäftigen, lassen sich größtenteils in den Themenfeldern Portfoliomanagement, Prozessmanagement und Untersuchungen der Arbeitsleistung von Teams finden. Viele dieser Quellen bauen auf Theorien aus der Organisationsforschung von Thompson [1967] auf. In Kiggundu [1981] und Kiggundu [1983] sind außerdem detaillierte Betrachtungen von Abhängigkeiten zwischen Aufgaben (engl. *task interdependence*) mit Referenzen zu weiteren grundlegenden Theorien aus der Vergangenheit zu finden. Darin wird Abhängigkeit als „*connectedness between jobs such that the performance of one depends on the successful performance of the other*“ [Kiggundu 1983, S. 146] definiert. Häufig synonym zu Abhängigkeit verwendete Begriffe sind Relation, Beziehung, Verhältnis oder Verbindung (engl. *relation* bzw. *relationship*) [Marle & Vidal 2016, S. 153].

Wie eingangs erwähnt, äußern sich Abhängigkeiten nicht nur zwischen Aktivitäten oder Aufgaben. Nach Worren [2012, S. 200] existiert eine Abhängigkeit, wenn die Tätigkeiten einer Organisationseinheit wichtige Resultate einer anderen Organisationseinheit beeinflussen. Für diese Arbeit soll folgende verallgemeinerte Definition gelten [in Anlehnung an Chucholowski *et al.* 2016c, S. 2]:

*Die einseitige Abhängigkeit beschreibt eine Qualität bzw. den Status einer Entität, die auf eine andere Entität angewiesen ist bzw. von dieser festgelegt, kontrolliert, bedingt oder beeinflusst wird. Eine wechselseitige Abhängigkeit besteht dann, wenn die Entitäten gegenseitig voneinander abhängig sind.*

*Entität* steht dabei als Platzhalter für jegliche Elemente eines Projektsystems (Ziele, Produktelemente, Prozesse, Organisationseinheiten, Werkzeuge/Tools). Der Begriff *Abhängigkeit* wird in dieser Arbeit allgemeingültig für einseitige Abhängigkeit (engl. *dependence*) und wechselseitige Abhängigkeit (engl. *mutual dependence* bzw. *interdependence*) genutzt. Er bezieht sich außerdem nicht nur auf die Qualität einer Entität, abhängig zu sein, sondern auch auf die dadurch entstehende Relation zwischen zwei Entitäten (vgl. Abbildung 3-7).

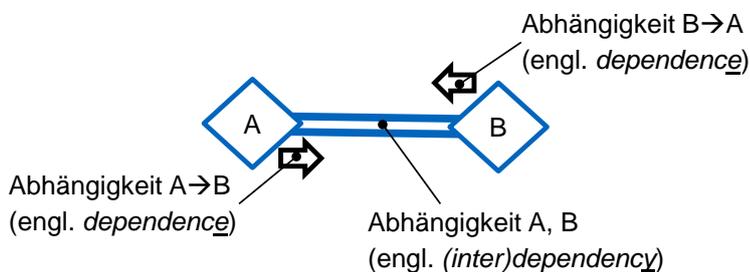


Abbildung 3-7 Illustration zur Veranschaulichung des Begriffs Abhängigkeit im Kontext dieser Arbeit.

## Unterschiedene Arten von Abhängigkeiten in der Literatur

In der Literatur werden verschiedene Arten von Abhängigkeiten unterschieden. Tabelle 3-5 gibt einen Überblick über in der Literatur identifizierte Abhängigkeitsarten.

Die Kategorisierung der Abhängigkeitsarten hängt stark vom Betrachtungsfokus ab. Einerseits wird zum Beispiel nach den Ursachen einer Abhängigkeit unterteilt, andererseits nach der Art der daraus resultierenden Interaktion. Teilweise sind bei den Einteilungen beide Perspektiven vereint. Mit konkretem Bezug auf Abhängigkeiten zwischen Aufgaben unterscheidet Kiggundu [1981, S. 501] außerdem nach der Abhängigkeitsrichtung, das heißt beispielsweise ob das Ergebnis einer Aufgabe andere Aufgaben beeinflusst (*initiated task interdependence*) oder ob eine Aufgabe von den Ergebnissen anderer Aufgaben beeinflusst wird (*received task interdependence*).

Eine mögliche Ursache für Abhängigkeiten wird zunächst in Produzent-Konsument-Beziehungen (wie z. B. Informations- oder Materialflüsse, Ergebnisabhängigkeiten) gesehen, die zu einer gewissen **Präzedenz** (Ablauflogik) führen. Die von Worren [2012] diskutierte *commitment interdependency* kann als eine Abstufung davon interpretiert werden. Eine weitere häufig differenzierte Abhängigkeitsursache sind **geteilte Ressourcen**. Ähnlich zu dieser Kategorie können Gründe gesehen werden, die eine gleichzeitige Durchführung (**Synchronizität**) zweier Prozesse notwendig machen (*simultaneity constraints*). Zusätzlich können sich Abhängigkeiten aus **hierarchischen Strukturen** ergeben (vgl. *hierarchical link, governance interdependencies, task/subtask*). Schließlich unterscheiden Lang & Madnick [1993, S. 11] und Worren [2012, S. 216] Abhängigkeiten, die auf **sozialen Zusammenhängen** beruhen.

Die Unterscheidung nach der Art der Interaktion wird bei der Einteilung nach Eppinger & Browning [2012, S. 133-134] am deutlichsten. Eine **einseitige Abhängigkeit** führt zu einer logischen Reihenfolge (Präzedenz), wobei die Abhängigkeitsbeziehung nur in eine Richtung verläuft. In Bezug auf Prozesse spricht man auch von einer Sequenz. Es werden vier verschiedene logische Beziehungen unterschieden (vgl. Kapitel 3.1.3). Eventuelle Informations- bzw. Ergebnisflüsse müssen dabei nicht zwingend diskret zwischen der Vorgänger- und Nachfolgeraktivität auftreten. Sie können auch im Verlauf der beiden Aktivitäten oder kontinuierlich stattfinden.

Bei **gegenseitiger Abhängigkeit** geht der Fluss in beide Richtungen, d. h. es handelt sich um einen Austausch (*coupled activities, reciprocal, exchange link*). Eine weitere Form der gegenseitigen Abhängigkeit, die nicht auf direkten Abhängigkeiten bzgl. Informationen bzw. Ergebnissen beruht, entsteht wenn (unabhängig voneinander) auf ein **gemeinsames Gesamtergebnis** hingearbeitet wird (*pooled interdependence, fit*). Die Unterteilung nach Mitwirkung (*contribution link*) und Einfluss (*influence link*) wird ähnlich dazu gesehen, wobei diese sowohl als direkte als auch indirekte Abhängigkeiten interpretiert werden können.

Abschließend können Abhängigkeiten insgesamt als *sicher* oder *möglich* betrachtet werden [Marle & Vidal 2016]. Eine Abhängigkeit zwischen zwei Elementen kann allgemein so interpretiert werden, dass eine Statusänderung von einem Element zu einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine Statusänderung des anderen Elements bewirkt. In diese Einteilung fallen auch **bedingte oder optionale Abhängigkeiten** (*conditional activities*), die von der jeweiligen Situation abhängen (vgl. *obligatorische* oder *präferierte* Präzedenz im Prozess, Kapitel 3.1.3).

Tabelle 3-5 Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Arten von Abhängigkeiten.

| Referenz  | Perspektive                  | Abhängigkeitsarten (freie Übersetzung des Autors)  |
|---|------------------------------|--|
| [Eppinger & Browning 2012, S. 133-134]                    | Art der Interaktion          | <i>Dependent: sequential activities</i> (Präzedenz)<br><i>Independent: parallel activities</i> (Unabhängig)<br><i>Interdependent: coupled activities</i> (Gegenseitige Abhängigkeit)<br><i>Contingent: conditional activities</i> (Bedingt oder auch Optional)                   |
| [Kiggundu 1981, S. 501]                                   | Abhängigkeitsrichtung        | <i>Initiated task interdependence</i> (Erzeugende Abhängigkeit)<br><i>Received task interdependence</i> (Erhaltende Abhängigkeit)  |
| [Lang & Madnick 1993, S. 10-11]                           | Ursache                      | <i>Information interfaces</i> (Informationsschnittstellen)<br><i>Material interfaces</i> (Materialschnittstellen)<br><i>Psychological interfaces</i> (Psychologische Schnittstellen)   |
| [Malone & Crowston 1994, S. 91]                           | Ursache                      | <i>Shared resources</i> (Geteilte Ressourcen)<br><i>Producer/consumer relationships</i> (Produzent-Konsument Beziehungen)<br><i>Simultainety constraints</i> (Synchronität)<br><i>Task/subtask</i> (Aufgabe-Teilaufgabe-Beziehungen)   |
| [Malone <i>et al.</i> 1999, S. 429-430]                   | Art der Interaktion, Ursache | <i>Fit</i> (Gemeinsames Gesamtergebnis)<br><i>Flow</i> (Präzedenz)<br><i>Sharing</i> (Geteilte Ressourcen)   |
| [Moser <i>et al.</i> 2015, S. 7]                          | Ursache                      | <i>Flow: results and information</i> (Ergebnis- und Informationsabhängigkeit)<br><i>Pool: shared resources</i> (Geteilte Ressourcen)   |
| [Thompson 1967, S. 54-55]                                 | Art der Interaktion          | <i>Pooled interdependence</i> (Indirekte Abhängigkeit bezüglich Gesamterfolg)<br><i>Sequential interdependence</i> (Präzedenz)<br><i>Reciprocal interdependence</i> (Gegenseitige Abhängigkeit)  |
| [Marle & Vidal 2016, S. 154; Vidal & Marle 2008, S. 1107] | Ursache, Art der Interaktion | <i>Hierarchical link</i> (Hierarchische Verbindung)<br><i>Contribution link</i> (Mitwirkung)<br><i>Sequential link</i> (Präzedenz)<br><i>Influence link</i> (Einfluss)<br><i>Exchange link</i> (Austausch)   |
| [Worren 2012, S. 201-221]                                 | Ursache                      | <i>Activity interdependencies</i> (Präzedenz)<br><i>Commitment interdependencies</i> (Verbindlichkeit)<br><i>Governance interdependencies</i> (Führung)<br><i>Resource interdependencies</i> (Geteilte Ressourcen)<br><i>Social network interdependencies</i> (Soziale Kontakte) |

### 3.2.2 Koordination

Wie in Kapitel 2.1.4 definiert, beschreibt Koordination eine bewusste Intervention zur Definition von Maßnahmen, die die gegenseitige Abstimmung unterstützen. Malone & Crowston [1994, S. 91] nennen solche Koordinationsmaßnahmen auch **Koordinationsmechanismen** (engl. *coordination mechanisms*) und legen mit ihrer Arbeit den Grundstein für die sogenannte Koordinationstheorie (siehe auch Crowston *et al.* [2006]). Mit dem allgemeinen Verständnis, dass Koordination das Management von Abhängigkeiten ist, nehmen sie an, dass für unterschiedliche Abhängigkeitsarten (vgl. Kapitel 3.2.1) jeweils geeignete Koordinationsprozesse vorgeschlagen werden können. In einer späteren Veröffentlichung erwähnen sie eine entsprechende Bibliothek für generische Koordinationsmechanismen als Teil eines Handbuchs für Organisationsprozesse [Malone *et al.* 1999, S. 429-431], wobei die allgemeingültige Anwendbarkeit der darin vorgeschlagenen Koordinationsmechanismen zum aktuellen Kenntnisstand nicht abschließend überprüft wurde [Crowston *et al.* 2006, S. 135]. Außerdem werden in den Veröffentlichungen stets nur beispielhafte Koordinationsmechanismen genannt (vgl. Tabelle 3-6).

*Tabelle 3-6 Beispiele für typische Abhängigkeitsarten und alternative Koordinationsmechanismen nach Malone & Crowston [1994, S. 91, Table 1].*

| Abhängigkeitart                  | Beispielhafte Koordinationsmechanismen für das Management von Abhängigkeiten einer bestimmten Art   |
|----------------------------------|---|
| Geteilte Ressourcen              | „First come/first serve“, Budgetverteilung, priorisierte Aufträge, Managemententscheidung, markt-ähnliches Bieten   |
| Produzent-/Konsument-Beziehungen | Benachrichtigung, Sequenzierung, Verfolgung<br>Inventarmanagement, wie z. B. „Just in time“<br>Konkret im Fall von Design for manufacturability: Concurrent Engineering |
| Gleichzeitigkeitsbedingungen     | Terminplanung, Synchronisation  |
| Aufgabe-Teilaufgabe-Beziehungen  | Zielauswahl, Aufgabendekomposition  |

Weitere Organisations- und Managementforschung hat diverse Frameworks und Typologien für Koordinationsmechanismen hervorgebracht. Ein Großteil geht auf die Einteilung nach March & Simon [1958] in ihrem Buch „Organizations“ zurück (zitiert nach Alexander [1993]):

- **Koordination durch Planung:** In Plänen wird festgehalten, wer sich wann mit wem abstimmen soll. Alexander [1993, S. 328-329] nennt diese Form der Koordination auch antizipative Koordination.
- **Koordination durch Feedback:** Die Abstimmung erfolgt situativ durch zwischenmenschliche Kommunikation. Alexander [1993, S. 328-329] nennt diese Koordinationsform auch adaptive Koordination (durch Überwachung, Feedback und Kontrolle).

Eine weitere Einteilung basiert auf Martinez & Jarillo [1991, S. 431-432], die formelle und subtile Koordinationsmechanismen unterscheiden (Tabelle 3-7). Alexander [1993, S. 332]

übernimmt diese Kategorien, um formelle bzw. informelle Koordinationsmittel zu unterscheiden. An anderer Stelle werden die zwei Kategorien auch als technokratische bzw. personenorientierte Koordinationsinstrumente (vgl. Festing & Okech [2008, S. 254]) oder als mechanistische bzw. organische Koordinationsstrategien/-mechanismen [Lang & Madnick 1993, S. 19-22] bezeichnet.

Tabelle 3-7 Einteilung unterschiedlicher Formen der Koordination in der Literatur.

| Referenz   | Formen der Koordination   |                                     |   |   |   |
|--|---|-------------------------------------|---|---|---|
| <b>Koordinationsmechanismen</b> nach Martinez & Jarillo [1991, S. 432] | Formell:<br>Zentralisierung, Formalisierung, Planung, Ergebnis- und Verhaltenskontrolle   |                                     | Subtil:<br>Laterale Beziehungen, Informelle Kommunikation, Entwicklung einer Organisationskultur                        |   |   |
| <b>Koordinationsmittel</b> nach Alexander [1993, S. 332]               | Formell:<br>Gemeinsame/s Führung/Gremium, gemeinsame Planung, räumliche Zusammensetzung ( <i>colocation</i> ), Verträge/Vereinbarungen, Statuten/Regulationen |                                     | Informell:<br>Telefonate, Besprechungen, Schriftwechsel   |   |   |
| <b>Koordinationsstrategien</b> nach Lang & Madnick [1993, S. 19]       | Märkte:<br>Koordination durch Angebot und Nachfrage   |                                     | Hierarchien:<br>Koordination durch Kontrolle und Führung  |   | Netzwerke:<br>Selbstregulierende Koordination mit Hilfe von IT                                  |
|  | Mechanistische Strategien:<br>Formell, zentralisiert, kontrollierend  |                                     | Organische Strategien:<br>Informell, dezentralisiert, kooperativ  |   |   |
|  | Gemeinsame Angleichung  | Direkte Betreuung                   | Standardisierung des Arbeitsprozesses   | Standardisierung des Arbeitsergebnisses | Standardisierung der Arbeitsfähigkeiten   |
| <b>Koordinationsmechanismen</b> nach Lang & Madnick [1993]             | Mechanistische Mechanismen:<br>Regeln und Programme, direkte Führung, Planung und Ziele, Management-Informationssysteme, „Liaisons-Position“                  |                                     | Organische Mechanismen:<br>Direkte Kontakte, Cross-funktionale Teams, Unabhängige Integrierten, Integrierte Abteilungen |   |   |
| <b>Integrationsmodi</b> nach Kim <i>et al.</i> [2003, S. 330]          | Zentralisierung   | Formalisierung                      | Informationssysteme   | Persönliche Interaktion                 |   |
| <b>Koordination</b> nach Schelle <i>et al.</i> [2008, S. 31]           | Koordination durch Hierarchie (persönliche Weisung)   | Koordination durch Selbstbestimmung | Koordination durch Programme und Regeln   | Koordination durch Pläne                |   |
| <b>Schnittstellenmanagement</b> nach Lang & Madnick [1993, S. 15-18]   | Schnittstellen abschaffen:<br>Fokussierung auf Kernkompetenzen, Bevollmächtigung (Übertragung der Verantwortung auf Unterebene)                               |                                     | Schnittstellen überarbeiten:<br><i>Business Re-engineering</i> , <i>Outsourcing</i>                                     |   | Schnittstellen glätten:<br>Zeitbasierter Wettbewerb, Schlanke Produktion, Lernende Organisation |

Neben dieser grundlegenden Einteilungen ist in der Literatur von unterschiedlichen Koordinationsstrategien, Koordinationsmechanismen, Koordinationsmitteln oder auch Integrationsmodi die Rede, wobei sich diese in ihrer Bedeutung stark ähneln und in der Literatur nicht explizit voneinander abgegrenzt werden (vgl. Tabelle 3-7). Die Mechanismen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Zentralisierung:** Mit *Zentralisierung* ist eine Bündelung der Entscheidungsgewalt (meist auf höher gelegener Hierarchieebene) gemeint, was dem Kommunikationsmittel *Gemeinsame/s Führung/Gremium*, der Koordinationsstrategie *Hierarchien*, der *direkten Führung* und der *Koordination durch Hierarchie* entspricht. Ähnlich dazu ist auch die *Ergebnis- und Verhaltenskontrolle*, was für eine Überwachung und Bewertung von Arbeitsergebnissen und Verhalten in der Personalführung steht.
- **Koordinatoren:** Die Institutionalisierung von „*Liaisons-Positionen*“ oder von *unabhängigen Integratoren* als eine Art Stabstelle ist neben der Zentralisierung eine weitere Möglichkeit, die Abstimmung zwischen Abteilungen oder Teams zu regeln.
- **Formalisierung:** Die *Formalisierung* bezeichnet die Festlegung und Standardisierung von Richtlinien, Regeln, Jobbeschreibungen, etc. und entspricht den Mitteln *Verträge/Vereinbarungen*, *Statuten/Regulationen*, *Standardisierung des Arbeitsprozesses*, *Standardisierung der Arbeitsergebnisse*, *Standardisierung der Arbeiterfähigkeiten* und der *Koordination durch Programme und Regeln*.
- **Planung:** Die *Planung* zielt auf die Vereinbarung von Zielen und die *gemeinsame Planung* der Umsetzung dieser ab (siehe auch *gemeinsame Angleichung*, *Planung und Ziele*, *Koordination durch Pläne*).
- **Laterale Beziehungen:** Durch die Bildung *cross-funktionaler Teams*, *integrierter Abteilungen* oder Task-Forces sowie durch die Förderung des abteilungsübergreifenden Austauschs werden *laterale Beziehungen* erzeugt. Dieser Koordinationsmechanismus entspricht auch der Idee hinter der *Koordination durch Selbstbestimmung* bzw. der Koordinationsstrategie *Märkte*, wo die Abstimmung innerhalb einer Gruppe der Gruppe selbst überlassen wird.
- **Informelle Kommunikation:** Die *informelle Kommunikation* ist ein weiterer Aspekt der *Koordination durch Selbstbestimmung*. Sie kann durch *persönliche Interaktion* in *Telefonaten*, *Besprechungen* oder *Schriftwechseln* erfolgen. Sowohl die *Entwicklung einer Organisationskultur* durch Sozialisierung der Organisationsmitglieder als auch eine *räumliche Zusammensetzung* begünstigt dabei die informelle Kommunikation.
- **Informationssysteme:** Neben der informellen Kommunikation bzw. persönlichen Interaktion stellen *Informationssysteme*, die einen Informationsfluss über Datenbanken, E-Mails, Internet/Intranet oder andere elektronische Medien sicherstellen, einen wichtigen Koordinationsmechanismus dar.

Eine ähnliche, jedoch weniger konsolidierte Liste unterschiedlicher Koordinationsmechanismen ist auch in Browning [2009b] zusammengestellt. Zusätzlich zu solchen Koordinationsmechanismen diskutieren Lang & Madnick [1993, S. 4] in ihrem Framework zum Umgang mit organisationalen Schnittstellen die Möglichkeit, die **Abhängigkeiten** an sich zu **beein-**

**flussen**, zu **verändern** oder sogar **abzuschaffen**. In Organisationen werden Gruppierungen (Abteilungen, Teams) gebildet, um Koordinationskosten zu minimieren [Thompson 1967, S. 57]. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass Koordinationskosten innerhalb einer Abteilung bzw. eines Teams niedriger sind als zwischen unterschiedlichen Abteilungen oder Teams [Worren 2012, S. 7]. Dies kann damit begründet werden, dass Personen innerhalb einer Gruppe normalerweise der bzw. dem gleichen Vorgesetzten berichten, die gleichen Ziele und Prioritäten verfolgen, auf gleiche Ressourcen zurückgreifen, üblicherweise am gleichen Standort arbeiten, und im Laufe der Zeit eine gemeinsame Kultur etablieren [Worren 2012, S. 7]. Ein weiterer möglicher Koordinationsmechanismus ist demnach die **Organisationsstruktur so um zu gestalten**, dass Abhängigkeiten innerhalb eines Clusters von Organisationseinheiten maximiert und Abhängigkeiten zwischen solchen Clustern minimiert werden [Marle & Vidal 2016, S. 206].

Darüber hinaus besteht heutzutage die Möglichkeit der virtuellen Zusammenarbeit bzw. die **Bildung von virtuellen Teams** (vgl. PMI [2013, S. 271]), was einen neuartigen Koordinationsmechanismus darstellt. Dadurch wird es möglich auch geografisch verteilte Personen zu koordinieren und die Koordinationskosten (z. B. aufgrund von Reisekosten) zu reduzieren [PMI 2013, S. 271]. Nachteile liegen jedoch darin, dass leicht Missverständnisse auftreten können, sich einzelne Teammitglieder isoliert fühlen können und Schwierigkeiten bestehen, Wissen und Erfahrungen zu teilen.

Die gezielte Kombination unterschiedlicher Koordinationsmechanismen zum Management bestimmter Abhängigkeitsarten ergibt einen Koordinationsprozess (vgl. Malone & Crowston [1994]). In der Literatur beschriebene Koordinationsprozesse können aber noch eine weitere Form annehmen. Sie stehen für die operativen Tätigkeiten im Umgang mit einer Abhängigkeit. Patzak & Rattay [2009, S. 28-29] beschreiben zum Beispiel in ihrem Projektmanagement-Leitfaden einen Koordinationsprozess (Abbildung 3-8) für Phasenübergänge, das heißt für Übergänge zwischen sequentiell verlaufenden Prozessen (Abhängigkeitsart Präzedenz). Der Koordinationsprozess regelt die Integration bzw. Zusammenführung von Zwischenergebnissen und den Umgang mit Abweichungen und Änderungen.

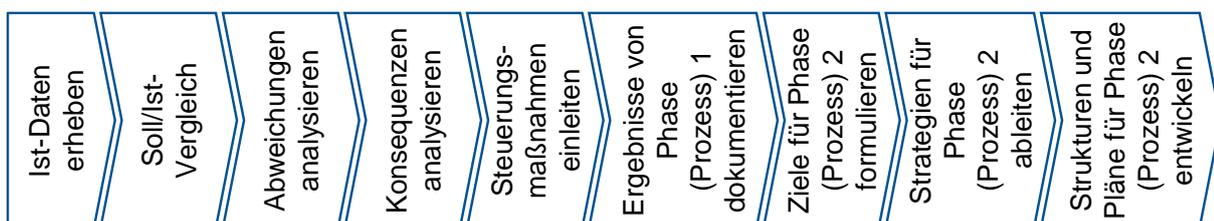


Abbildung 3-8 Koordinationsprozess für Phasenübergänge nach Patzak & Rattay [2009, S. 28-29].

Diese Art von Koordinationsprozess findet nicht nur auf Makroebene an Phasenübergängen statt. Solche Tätigkeiten können als Teil der eigentlichen Entwicklungsarbeit gesehen werden und finden kontinuierlich auf Mikroebene statt. Parraguez *et al.* [2014, S. 3] definieren dafür den Begriff *integrative work activities*, um entsprechende Aktivitäten von den klassischen

Entwicklungsaktivitäten<sup>24</sup> zu differenzieren. Weitere konkrete Ansätze und Definitionen solcher Koordinationsprozesse wurden im Rahmen der Literaturrecherchen nicht identifiziert.

### 3.2.3 Synchronisationsmanagement

Wie bereits in Kapitel 2.1.4 erwähnt, wird im Ingenieursumfeld im Zusammenhang mit Koordination auch oft der Begriff Synchronisation verwendet. Das Synchronisationsmanagement adressiert eine übergeordnete, globale Ebene der Koordination. Es beinhaltet die derartige Gestaltung (bzw. Planung) eines Projekts, sodass voneinander abhängige Prozesse sowohl zeitlich als auch inhaltlich aufeinander abgestimmt sind.

In Chucholowski *et al.* [2016b, S. 1468] wird ein Überblick über in der Literatur beschriebene Praktiken des Synchronisationsmanagements gegeben. Die Praktiken können in antizipative und reaktive Ansätze eingeteilt werden (vgl. Tabelle 3-8).

Tabelle 3-8 Synchronisationsmanagementansätze nach Chucholowski *et al.* [2016b, S. 1468, Table 2].

| <b>Antizipative Ansätze: Erzeugung von Alignment und Plänen zur Koordination</b> | <b>Reaktive Ansätze: Situative Unterstützung zur Koordination</b> |
|--|---|
| Verknüpfung von Produkt- und Prozessmodellen                                     | Planung von Mini-Synchronisation                                  |
| Erzeugung eines generischen Synchronisationsframeworks                           | Pulsierung  |
| Erzeugung eines Synchronisationsplans  | Bedingungsloser Start eines Prozesses                             |
| Planung von Synchronisationspunkten / Qualitäts-Gates                            | Veränderung von Randbedingungen                                   |
| Erzeugung eines gemeinsamen Hintergrundwissens                                   | Zusammenarbeit mit dem Konfigurationsmanagement                   |

#### Antizipative Ansätze

Die antizipativen Ansätze zielen auf die Herstellung von Alignment und die Erstellung von Plänen zur Koordination ab. Eine Möglichkeit besteht grundsätzlich in der **Verknüpfung von Produkt- und Prozessmodellen**, wodurch die Zusammenarbeit in parallel ablaufenden, aber voneinander abhängigen, disziplinspezifischen Prozessen unterstützt werden kann [Wenzel 2003, S. 81]. Hellenbrand [2013] stellt hierfür eine Methodik bereit. Durch ein **generisches Synchronisationsframework** [Negele *et al.* 2006; Tristl *et al.* 2013] wird ein einheitliches Verständnis von Begriffen, allgemeinen Abläufen und Abhängigkeiten im Entwicklungsprozess eines Unternehmens geschaffen. Das generische Framework kann weiter in einem **projektspezifischen Synchronisationsplan** (auch Masterplan genannt) detailliert werden, wodurch abteilungsübergreifende Abhängigkeiten identifiziert werden und die diesbezügliche Kommunikation unterstützt wird [Negele *et al.* 2006]. Die systematische **Definition von Synchronisationspunkten**, zu denen Ergebnisse und Informationen ausgetauscht werden, strukturiert die notwendigen Interaktionen zwischen unterschiedlichen Prozessen (vgl. Hellenbrand

<sup>24</sup> Vgl. Sim & Duffy [2003] für eine umfassende Taxonomie für Entwicklungsaktivitäten

[2013]). Synchronisationspunkte können dabei interdisziplinäre Meilensteine, Reviews, Qualitäts-Gates, Workshops, Freigaben oder Entscheidungen darstellen [Schuh 2013, S. 184; Tristl *et al.* 2013]. Im Ansatz des kollaborativen Projektmanagements bezeichnet Stuffer [1994, S. 68-71] solche Synchronisationspunkte auch als Meilensteine erster Ordnung. Schließlich fördert die **Erzeugung eines gemeinsamen Hintergrundwissens** das Verständnis interdisziplinärer Zusammenhänge und dadurch die Abschätzung von Auswirkungen eigener Handlungen auf das Gesamtsystem [Carroll *et al.* 2003].

### Reaktive Ansätze

Ansätze, die eher eine situative Koordinationsunterstützung während der Entwicklung darstellen, werden hier als reaktive Ansätze klassifiziert. So schlägt Zielinski [2009, S. 63] zum Beispiel vor, dass für stark voneinander abhängige Prozesse regelmäßige Synchronisationspunkte im Sinne einer rollierenden Planung kontinuierlich geplant werden („**Mini-Synchronisation**“). Die Definition solcher Meilensteine zur zeitlichen Beherrschung von Schnittstellen nennt Stuffer [1994, S. 68-71] Meilensteine zweiter Ordnung. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die sogenannte **Pulsierung**, nach der – ungeachtet des geplanten inhaltlichen Fortschritts – in regelmäßigen Abständen die zeitliche Abstimmung abhängiger Prozesse sichergestellt wird [Schuh 2013]. Der **bedingungslose Start eines Prozesses**, der von einem anderen verzögerten Prozess abhängig ist, stellt einen weiteren situativen Ansatz dar. Die Synchronisation kann dadurch wieder hergestellt werden, dass der abhängige Prozess mit vorläufigen bzw. abgeschätzten Informationen oder mit vom Vorgängerprozess unabhängigen Aktivitäten startet [Wenzel 2003, S. 77]. Dadurch steigt zwar voraussichtlich der Arbeitsaufwand für den Prozess, weil einzelne Aktivitäten aufgrund aktualisierter Informationen erneut durchgeführt werden müssen (vgl. Loch & Terwiesch [2005]). Die Verzögerung kann dadurch jedoch reduziert oder eliminiert werden. Wenzel [2003, S. 77] schlägt außerdem vor, dass Prozesse durch die **Änderung von Randbedingungen** synchronisiert werden können. Schließlich ermöglicht das **Konfigurationsmanagement** eine kontinuierliche Überwachung von Veränderungen in voneinander abhängigen Prozessen [Ebert & Man 2008]. Durch die Kommunikation dieser Veränderungen bleibt das Entwicklungsteam informiert und Schnittstellen können entsprechend angepasst werden.

### 3.2.4 Fazit

Klassische Projektplanungsmethoden, die das Entwicklungsprojektmanagement in Unternehmen dominieren (z. B. Kritische-Pfad-Methode, Gantt-Diagramme), behandeln Abhängigkeiten stark vereinfacht als diskrete Präzedenz-Beziehung zwischen Aktivitäten. Eine Vielzahl von Forschungsarbeiten in Organisations-, Betriebs- und Ingenieurwissenschaften deuten jedoch darauf hin, dass das Thema Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten weitaus differenzierter betrachtet werden muss.

Generell führen Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten zu Bedarf für Interaktion bzw. Abstimmung, welcher sowohl im Prozess als auch in der Organisation berücksichtigt werden muss. Erstens kann eine notwendige Interaktion – abgesehen von einer zufällig stattfindenden Abstimmung – nur dann realisiert werden, wenn die abzustimmende Abhängigkeit bekannt und als solche erkannt ist. Zweitens muss die Interaktion koordiniert werden, um eine effizien-

ente und effektive Abstimmung sicherzustellen. In anderen Worten: Eine **Abhängigkeit** führt zu **Abstimmungsbedarf**, und diese wiederum zu **Koordinationsbedarf**.

Im Allgemeinen erfolgt eine Abstimmung durch Kommunikation und Zusammenarbeit, wofür diverse Methoden, Werkzeuge und Technologien bereitstehen (nicht Fokus dieser Arbeit). In Bezug auf Koordination werden in der Literatur Koordinationsmechanismen unterschieden, die eingesetzt werden können, um Abstimmung gezielt (z. B. je nach Abhängigkeitsart) zu gestalten. Im ingenieurwissenschaftlichen Umfeld existieren Ansätze (sog. Synchronisationsmanagement), die vorwiegend eine prozessseitige Koordination durch die Erstellung von Plänen unterstützen, wobei diese größtenteils von bekannten Abhängigkeiten ausgehen. Im folgenden Kapitel werden Ansätze diskutiert, die Projektsysteme analysieren und damit eine Identifikation zu koordinierender Abhängigkeiten ermöglichen.

### 3.3 Strukturbasierte Analyse von Projektsystemen

Es existieren zahlreiche Ansätze zur strukturbasierten Analyse von Zusammenhängen in Entwicklungsprojekten. Browning [2016] verschafft einen ausführlichen Überblick über Literatur, in der matrixbasierte Methoden zur Strukturmodellierung und -analyse beschrieben werden (DSM, DMM und MDM). Die identifizierten Arbeiten fokussieren größtenteils entweder auf Produktarchitekturen, Prozessstrukturen, Organisationsstrukturen oder auf eine Kombination dieser Systeme. Neben den konzeptionellen Schwerpunkten Modellbildung, Visualisierung und Analyse werden häufig konkrete Anwendungsmöglichkeiten in Form von Fallstudien beschrieben, die üblicherweise alle drei konzeptionellen Schwerpunkte beleuchten.

Grundlagen zur Strukturmodellierung und -analyse im Kontext der Produktentwicklung werden in Browning [2001]; Eppinger & Browning [2012]; Lindemann *et al.* [2009] aufgezeigt (vgl. auch Kapitel 2.5). Eppinger & Browning [2012] präsentieren außerdem mehrere Fallstudien, die das grundsätzliche Analysepotential von Systemstrukturen beispielhaft veranschaulichen. Ergänzend seien Publikationen genannt, die grundlegende Verknüfungsprinzipien für domänenübergreifende Zusammenhänge (d. h. zwischen unterschiedlichen Teilsystemen) beschreiben [Danilovic & Browning 2007; Eppinger & Salminen 2001; Yassine *et al.* 2003].

Für diese Arbeit sind Ansätze relevant, die mindestens zwei Teilsysteme im Projektsystem verknüpfen und insbesondere Implikationen für die Koordination bzw. für die Kommunikation oder Zusammenarbeit in der Entwicklung betrachten. Neben den von Browning [2016] gesammelten matrixbasierten Ansätzen existieren vereinzelte graphenbasierte Ansätze, die Möglichkeiten zur informationstechnischen Umsetzung der Modellbildung beschreiben. Sie zielen auf die Unterstützung des Managements von Entwicklungsprojekten ab, indem sie Strukturdaten verwalten und handhabbar machen.

Im Folgenden werden die in der Literatur identifizierten und für diese Arbeit relevanten Ansätze in drei Gruppen eingeteilt. Einerseits betrachtet eine Vielzahl von Forschungsarbeiten die (domänenübergreifende) Ableitung indirekter Zusammenhänge aus modellierten Strukturen bzw. stellt Strukturen einzelner Systeme gegenüber. Andererseits werden Kennzahlen zur Analyse der strukturellen Zusammenhänge in den modellierten Systemen berechnet. Die dritte Gruppierung betrifft Ansätze, die explizit auf das Management von Entwicklungsprojekten auf Basis von Strukturmodellen abzielen.

### 3.3.1 Ableitung indirekter Zusammenhänge aus Strukturmodellen

Prinzipiell können Relationen innerhalb eines Systems A (z. B. als  $DSM_A$  modelliert) durch eine Verknüpfung mit einem zweiten System B (z. B. in einer  $DMM_{AB}$ ) zur Ableitung indirekter Zusammenhänge innerhalb des Systems B genutzt werden (vgl. Kapitel 2.5.3). Verschiedene Studien zeigen, dass auf Basis des technischen Informationsflusses zwischen Aufgaben (z. B. Morelli *et al.* [1995]) oder auf Basis von Produktzusammenhängen (z. B. Biedermann & Lindemann [2011]) die schließlich tatsächlich stattfindende Kommunikation zwischen beteiligten Personen vorhergesagt werden kann. Produktzusammenhänge können sogar als primäre Quelle für notwendige Interaktion zwischen Organisationseinheiten in Entwicklungsprojekten gesehen werden [Sosa *et al.* 2004, S. 1675].

Bereits Pimmler & Eppinger [1994] ziehen aus Clustern in der Produktstruktur Rückschlüsse für die Bildung von Entwicklungsteams. Dabei nehmen sie an, dass Personen, die mit der Entwicklung von Produktumfängen innerhalb eines Clusters betraut sind, gemeinsamen Abstimmungsbedarf haben, und dass die Koordination innerhalb eines Teams begünstigt ist. Die Annahme, dass sich die Produktstruktur in der Organisationsstruktur widerspiegeln sollte, ist auch als „*Mirroring Hypothesis*“ bekannt. Sie wird zwar tendenziell, aber nicht zwangsläufig als gültig gesehen, weil organisationale Zusammenhänge vielschichtiger sind als reine Teamzugehörigkeiten (vgl. Colfer & Baldwin [2016]). Die Annahme setzt außerdem voraus, dass die Modellierung der Produktzusammenhänge richtig und vollständig ist. Bei der Entwicklung eines neuen Produkts entwickelt sich die tatsächliche Produktarchitektur aber häufig erst im Laufe des Projekts.

Je nach Betrachtungsperspektive werden die Implikationen von einer Systemstruktur auf eine andere unterschiedlich abgeleitet (Tabelle 3-9). Letztlich wird jedoch auch erwähnt, dass alle drei Systeme in der Regel gegenseitig Einfluss aufeinander nehmen und in einem Entwicklungsprojekt gemeinsam evolvieren [Eppinger & Salminen 2001]. Auffallend ist, dass die Produktarchitektur (Struktur im Produktsystem) teilweise gleichbedeutend zum Aufgabennetz (Prozesssystem) gesehen wird (z. B. Colfer [2009]; Morelli *et al.* [1995]; Parraguez [2015]).

Tabelle 3-9 Ableitung domänenübergreifender Implikationen in Bezug auf Koordination in der Literatur.

| Ableitungslogik                         | Referenzen   |
|---|--|
| Produktstruktur → Prozessstruktur       | [Eppinger & Salminen 2001; Hellenbrand 2013; Parraguez 2015]   |
| Produktstruktur → Organisationsstruktur | [Biedermann & Lindemann 2011; Browning 2009b; Colfer 2009; Elezi <i>et al.</i> 2011; Eppinger & Salminen 2001; Gokpinar <i>et al.</i> 2010; Oosterman 2001; Sosa <i>et al.</i> 2003, 2004; Sosa <i>et al.</i> 2007; Sosa 2008] |
| Prozessstruktur → Organisationsstruktur | [Browning 2009b; Eppinger & Salminen 2001; Hellenbrand 2013; Morelli <i>et al.</i> 1995; Parraguez 2015; Parraguez <i>et al.</i> 2015; Parraguez <i>et al.</i> 2016; Yang <i>et al.</i> 2014]                                  |

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass viele unterschiedliche Ansätze und Beispiele zur Strukturbetrachtung der Teilsysteme eines Entwicklungsprojekts existieren, die auf die Ableitung von Kommunikations-, Abstimmungs- bzw. Koordinationsbedarfen entweder auf Pro-

zess- oder auf Organisationsebene abzielen. Die Ableitung basiert auf technischen Zusammenhängen, die entweder in der Produktarchitektur oder in Form von Informationsflüssen in einer vorhandenen bzw. geplanten Prozessstruktur manifestiert sind. Keiner der Ansätze modelliert die drei Projektsysteme bewusst als ein integriertes Gesamtsystem. In wenigen Ansätzen kommen zwar Elemente aus allen drei Systemen vor, die Struktur des dritten Systems wird aber entweder gar nicht modelliert (z. B. Personen in Hellenbrand [2013]) oder spiegeln eins zu eins die Produktstruktur wider (z. B. Aufgaben in Parraguez [2015]).

### 3.3.2 Analyse struktureller Zusammenhänge

Neben der Nutzung struktureller Zusammenhänge zur Ableitung indirekter Relationen können diese auch an sich analysiert werden. Dazu zählen einerseits Untersuchungen wie Cluster-Analysen oder die Triangularisierung, die die komplette Struktur eines Systems betreffen (vgl. Eppinger & Browning [2012, S. 5]). Hierzu sei auf die bereits erwähnten Betrachtungen von Pimmler & Eppinger [1994], oder auch auf die Betrachtungen der Produktstruktur und deren Korrelation mit Unternehmenscharakteristika von Baldwin *et al.* [2013] hingewiesen.

Andererseits können Systeme hinsichtlich verschiedener struktureller Merkmale für einzelne Elemente, Relationen oder Teilstrukturen analysiert werden (vgl. Kapitel 2.5.2). Eine umfassende Liste möglicher Strukturmerkmale zur Prozessanalyse und deren Interpretationsmöglichkeiten (unter anderem zur Betrachtung des Kommunikationsbedarfs) wird von Kreimeyer & Lindemann [2011] präsentiert. Weitere Prozessbetrachtungen bezüglich der Rolle einzelner Aktivitäten bzw. Aufgaben (Einfluss auf andere Elemente, Regulierung des Informationsflusses zwischen zwei Elementen bzw. Elementgruppen) finden sich in Collins *et al.* [2009]. Ähnliche Betrachtungen werden von Batallas & Yassine [2006] mit Bezug auf Organisationseinheiten und deren Informationsflüsse durchgeführt.

Gokpinar *et al.* [2010] berechnen in ihrem Vergleich der Produktarchitektur und der Organisationsstruktur ein sogenanntes Koordinationsdefizit, das auf eine fehlende Abstimmung der beiden Systemstrukturen aufeinander hinweist. Sie beobachten anhand ihrer Daten außerdem, dass der Zusammenhang zwischen der Kritikalität eines Produktelements und beobachtbaren Qualitätsproblemen in Form eines umgedrehten U beschrieben werden kann. Das könne damit erklärt werden, dass besonders kritische Elemente ohnehin erhöhte Aufmerksamkeit in der Entwicklung genießen, Elemente mittlerer Kritikalität dagegen nicht adäquat adressiert werden. Genauso kann ein Zusammenhang zwischen Qualitätsproblemen und Koordinationsdefiziten aufgezeigt werden. Auch Parraguez *et al.* [2016] nutzen Strukturmerkmale wie Netzwerkgröße, Dichte oder kompositionelle Vielfalt zur Charakterisierung von Interaktionsnetzwerken zwischen Personen, die an zwei voneinander abhängigen Aktivitäten beteiligt sind. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass Probleme an der Schnittstelle zwischen zwei abhängigen Aktivitäten vorwiegend dann berichtet werden, wenn das Interaktionsnetzwerk beteiligter Personen groß ist, eine niedrige Dichte hat und von mittlerer kompositioneller Vielfalt (z. B. beteiligte Disziplinen) ist.

Marle & Vidal [2016, S. 146] sehen eine integrierte Betrachtung der Projekt-Teilsysteme vor und berechnen strukturelle Kennzahlen zur Charakterisierung der Komplexität von Projekten. Mit der integrierten Modellierung des Projektsystems zielen sie darauf ab, die Fortpflanzung

von Risiken abschätzen zu können bzw. eine Fortpflanzung durch gezielte Anpassung der Projektstruktur zu verändern.

Sofern entsprechende Daten zur Modellierung der Systemstrukturen in Entwicklungsprojekten vorhanden sind, lassen sich also vielversprechende Analysen durchführen. Diverse Vorarbeiten zeigen, welche Strukturmerkmale sich eignen können, um Entwicklungsprojekte nicht nur deskriptiv zu charakterisieren, sondern auch prospektiv mögliche Problemstellen zu identifizieren.

### 3.3.3 Managementansätze auf Basis von Strukturmodellen

Einzelne Ansätze in der Literatur gehen über eine Charakterisierung der betrachteten Strukturmodelle hinaus. Sie zielen auf die Planung und Kontrolle von Entwicklungsprojekten mit Hilfe von Strukturmodellen ab. Bartolomei *et al.* [2012] schlagen dafür vor, technische Systeme (damit sind auch Entwicklungsprojekte gemeint) mit ihren Elementen und Relationen aus den Domänen Systemtreiber, Stakeholder, Ziele, Funktionen, Objekte und Aktivitäten zu modellieren. Das resultierende, integrierte Strukturmodell ermöglicht es relevante Informationen über ein technisches System zu sammeln, zu speichern, zu verarbeiten und zu analysieren. Neben den im vorangegangenen Kapitel thematisierten Strukturanalysen unterstützt die integrierte Sichtweise außerdem die Abschätzung von Änderungsfortpflanzungen über mehrere Domänen hinweg. Auch Hellenbrand [2013] sieht in seinem Ansatz zur Planung und Synchronisation von Produktentwicklungsprozessen vor, neben dem Prozess (Aktivitäten und Dokumente) auch Verknüpfungen zum Produktsystem (Komponenten und Funktionen) und zum Organisationssystem (Personen) in einer MDM abzubilden. Durch die Ableitung indirekter Zusammenhänge wird die Planung von Meilensteinen bzw. Synchronisationspunkten unterstützt. Die Systemstruktur wird darüber hinaus dafür verwendet, den Projektfortschritt zu kontrollieren.

Auf eine Unterstützung der Planung eines Entwicklungsprojekts zielt auch der Ansatz *Project Design* ab [Moser & Wood 2015]. Basierend auf der Projektstruktur bestehend aus Produktelementen und deren Hierarchie, Teams und deren Hierarchie, sowie Entwicklungsaktivitäten und deren Abhängigkeiten wird der Projektverlauf simuliert und die Projektdauer sowie Projektkosten berechnet. Besonders ist, dass auf Basis der Zuordnungen der Teams auf Aktivitäten und der Beschaffenheit der Abhängigkeit zwischen Aktivitäten Aufwände zur Koordination explizit berücksichtigt werden [Moser & Wood 2015, S. 200-206].

Während *Project Design* die Planung eines Projekts und die Optimierung der Projektstruktur adressiert, existieren weitere Ansätze, die einen Weg für das durchgängige Management von Entwicklungsprojekten aufzeigen. Das bereits in Kapitel 3.1.4 angesprochene AHEAD-System stellt die informationstechnische Umsetzung eines integrierten Managementsystems von Projektdaten dar [Heller *et al.* 2008]. Ein ebenfalls umfassendes Projektdatenmanagement-System (allerdings für Bauprojekte entwickelt) wird von Both [2006] vorgestellt, das insbesondere auch auf die Modellierung der Kooperation abzielt. Zusätzlich zum Produktmodell (in diesem Fall repräsentiert durch Ziele und Aufgaben), Prozessmodell und Organisationsmodell ist darin ein Informationsmodell vorgesehen, in dem Koordinationsmechanismen wie z. B. Newsletter, Mailbox oder Termine dargestellt sind.

Die Managementansätze unterstützen einerseits die Speicherung von Wissen über Elemente und deren Zusammenhänge im Entwicklungsprojekt. Andererseits bilden sie die Grundlage für auf der Strukturmodellierung aufbauende Optimierungen der Projektstruktur über alle Domänen hinweg, für Abschätzungen zur Fortpflanzung von Änderungen im System, und für die explizite Betrachtung von Koordination im Projekt.

### 3.3.4 Fazit

Es existieren zahlreiche Studien, die darauf schließen lassen, dass technische Abhängigkeiten auf Produktebene ein wesentlicher Grund für Abstimmungsbedarfe im Entwicklungsprojekt sind. Aus der Produktstruktur können also Erkenntnisse über notwendige Informationsflüsse auf Prozessebene bzw. die notwendige Kommunikation und Zusammenarbeit auf Organisationsebene abgeleitet werden. Dabei unterstützen diverse Möglichkeiten zur Strukturbetrachtung wie das Clustering oder die Berechnung von Strukturmerkmalen, um auch komplexe Systeme analysieren zu können und aussagekräftige Erkenntnisse abzuleiten.

Das Review von Browning [2016] zeigt, dass es zahlreiche und vielversprechende Anwendungen für Strukturmodellierungen und -analysen gibt. Der Transfer in die industrielle Praxis scheint aber vor allem an dem hohen Aufwand zur Erhebung der notwendigen Daten für die Modellierung gehindert zu sein [Browning 2016, S. 40]. Die meisten in der Literatur beschriebenen Strukturmodelle werden manuell auf Basis von Interviews, Fragebögen oder Dokumentanalysen erzeugt. Nur wenige Ausnahmen basieren auf automatisch erzeugten Strukturdaten. So zeigen van Beek *et al.* [2010] wie ein Produktmodell in eine Produkt-DSM überführt werden kann und Baldwin *et al.* [2013] stützen ihre Analysen auf Softwarestrukturen, die aus Softwarecode abgeleitet wurden. Die Betrachtungen von Gokpinar *et al.* [2010] basieren auf einer großen Datenmenge von Änderungsanträgen, die hinsichtlich der Zusammenhänge für Produkt- und Organisationssystem interpretiert werden. Schließlich nutzen Parraguez *et al.* [2015] die E-Mail-Korrespondenz und Tätigkeitsprotokolle zur automatisierten Modellierung der tatsächlich stattfindenden Kommunikation im Projekt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass vorhandene Ansätze jeweils mindestens eine der folgenden Schwachstellen aufweisen:

- Bei der Ableitung von Implikationen bezüglich der Koordination werden entweder nur die Prozess- oder nur die Teamstruktur betrachtet. Auf Prozessebene beschränken sich die Analysen auf die Optimierung der Prozesssequenz auf Basis abgeleiteter Informationsflüsse. Auf Organisationsebene steht die Bildung von Teams durch Clusteranalysen im Vordergrund. Der zeitliche und inhaltliche Aspekt von Zusammenhängen bleibt außer Acht.
- Vorhandene Ansätze beschreiben kein durchgängiges, praxisorientiertes Vorgehen. Es bleibt unklar, wo die Daten über Projektzusammenhänge zur wiederholten Analyse im industriellen Kontext her kommen.
- Die vorhandenen Managementansätze zeigen zwar auf, wie die Projektdaten verwaltet werden können. Sie bilden jedoch ein zusätzliches System, in dem die Daten erzeugt und

gepflegt werden müssen. Außerdem stellen sie keine Unterstützung zur expliziten Koordinationsplanung zur Verfügung.

### 3.4 Datenmanagement in der Entwicklung

Durch die zunehmende Virtualisierung von Entwicklungsdokumenten und der Entwicklungsarbeit entstand bereits in den 1980er Jahren der Bedarf für Produktdatenmanagement-Systeme (PDM-Systeme, häufig auch als Engineering Data Management bzw. EDM bezeichnet) zur Dokumentverwaltung und zur Unterstützung des Freigabe- und Änderungswesens, der Versionsverwaltung und des Konfigurationsmanagements [Eigner 2014, S. 268]. Moderne Entwicklungsansätze (z. B. Model-based Systems Engineering, vgl. Kapitel 3.1.1) erfordern die zusätzliche Einbindung neuer Modellelemente wie Anforderungen, Funktionen oder Verhaltensmodelle und eine objektorientierte Verknüpfung aller Produktdaten aus den unterschiedlichen Sichten [Eigner 2014, 267-279]. Die Analyse großer Datenmengen, die in heutigen PDM-Systemen verfügbar sind, ist sehr vielversprechend (z. B. zur Analyse des Produktportfolios, vgl. [Kissel 2014]). Sie ist jedoch meistens mit großem Aufwand verbunden, weil Daten manuell zusammengetragen werden müssen und mehrere Analyseschritte unter Berücksichtigung diverser Bedingungen von Experten einzeln und händisch durchgeführt werden müssen [Kissel 2014, S. 73].

Helms & Kissel [2016] beschreiben einen Ansatz namens *Engineering Intelligence*, mit dem Analysen von Entwicklungsdaten durch die Kombination von Datenintegration und wissensbasierter Analyse automatisiert werden können. Der Ansatz sieht dafür einerseits eine automatisierte Zusammenführung verteilter Daten in einem integrierten Datengraphen und andererseits eine Formalisierung von Expertenwissen zur Analyse dieser Daten vor [Helms & Kissel 2016, S. 984]. Die Formalisierung von sonst in der Regel händisch durchgeführten Analyseschritten durch Algorithmen und Regeln zur Graphentransformation ermöglicht eine wiederholte Durchführung von Analysen ohne Zusatzaufwand.

Das Konzept der *Engineering Intelligence* bietet damit eine wertvolle Basis dafür, große Datenmengen bezüglich Elementen und Zusammenhängen in einem komplexen Entwicklungsprojekt mit geringem Aufwand zu analysieren. Moderne Softwaretechnologie wie GrGen.NET (vgl. Kapitel 2.5.3) ermöglicht es dabei, anwendungsspezifische Metamodelle zur Abbildung von Strukturmodellen in Graphen zu definieren, sowie Grapheninstanzen zu erstellen und mittels Graphentransformation zu modifizieren. Dadurch hat das Konzept großes Potential, die bisher überwiegend matrixbasierten Strukturbetrachtungen von Entwicklungsprojekten, die durch die Grenzen des Informationsgehalts und der Darstellungsmöglichkeiten von Matrizen eingeschränkt sind, deutlich zu erweitern.

### 3.5 Zusammenfassung Unterstützungsbedarf

#### Fehlendes Verständnis über Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten

Die hohe Komplexität heutiger Entwicklungsprojekte führt zu einem gesteigerten Abstimmungsbedarf, der durch klassisches Projektmanagement alleine nicht mehr zu bewältigen ist [Rauhut 2011, S. 6]. Generell zeigt sich, dass die etablierten Projektmanagement-Standards

wenig Unterstützung bezüglich zielgerichteter Koordinationsplanung zur Verfügung stellen (vgl. Kapitel 2.3). Sie vernachlässigen die vielfältigen Zusammenhänge zwischen den Elementen und stellen die Strukturen stattdessen stark vereinfacht in Listen, Baumstrukturen oder Aktivitätsnetzwerken dar [Marle & Vidal 2016, S. 162].

### **Fehlende Methoden zur projektspezifischen Planung der Koordination**

In vielen Unternehmen ist üblicherweise eine grobe und projektunabhängig geltende Ablaufstruktur mit den wichtigsten Informationsflüssen sowie Meilensteine bzw. Gates in Prozessplänen definiert. Durch das sogenannte *Tailoring* werden die generischen Prozesse zwar für ein Projekt instanziiert und an projektspezifische Rahmenbedingungen (Termine, notwendige Tests, etc.) angepasst. Konkrete, für das Projekt spezifische Zusammenhänge werden dabei jedoch nicht systematisch erfasst und berücksichtigt. Stattdessen wird es den Projektbeteiligten überlassen, dass sie Abstimmungsbedarfe, die sie betreffen, identifizieren und entsprechend adressieren. Insgesamt verlässt man sich dabei auf die situative Einschätzung (basierend auf Erfahrung) der „lokal“ beteiligten Personen für eine erfolgreiche Abstimmung bei auftretenden Abstimmungsbedarfen. Da Produkte selten von Null auf neu entwickelt werden und historisch gewachsene Teamstrukturen (u. a. auch Simultaneous Engineering Teams, cross-funktionale Teams, „Matrix-Teams“, etc.) die üblicherweise notwendige Zusammenarbeit fördern, findet ein Großteil der Abstimmung selbstverständlich statt. In Bezug auf neue Produktumfänge bleibt jedoch ein großes Risiko, wichtige Abstimmungsbedarfe nicht oder zu spät zu erkennen. Außerdem führt eine zunehmende Mitarbeiterfluktuation dazu, dass die zugrundeliegende Erfahrung tendenziell abnimmt [Moser *et al.* 2015, S. 2].

### **Schwächen vorhandener Ansätze zur strukturbasierten Analyse von Entwicklungszusammenhängen**

In der Literatur besteht ein breites Spektrum von Ansätzen, die auf Basis strukturbasierter Analysen zu Erkenntnissen hinsichtlich Abhängigkeiten und Koordination in einem Entwicklungsprojekt führen können. Viele dieser Ansätze stützen sich jedoch auf manuell modellierte Daten, was eine durchgängige Anwendung in der industriellen Praxis hindert. Die Betrachtung etablierter Modellierungsansätze und Modelle zeigt, dass umfangreiche Daten über Zusammenhänge innerhalb und zwischen dem Produkt-, Prozess- und Organisationssystem vorhanden sein können. Hier fehlt es den Analyseansätzen letztlich an Flexibilität, auf vorhandene Daten aufzubauen und diese für ihre Analysen zu verwenden.

Bestehende Ansätze zur strukturellen Analyse von Zusammenhängen in Entwicklungsprojekten greifen außerdem ausschließlich auf eine matrixbasierte Repräsentation der Daten zurück. Das schränkt die Modellbildung für Strukturanalysen insofern ein, dass Element- und Relationsattribute nur begrenzt sinnvoll verarbeitet werden können. Darüber hinaus spricht Sosa [2008, S. 54] eine große Schwäche der matrixbasierten Ableitung indirekter Zusammenhänge an: Bei der Matrixmultiplikation geht die Information verloren, über welche anderen Elemente der indirekte Zusammenhang zustande gekommen ist.

### **Bisher ungenutztes Potential durch moderne Ansätze zur Datenanalyse**

Eine alternative Speicherform für Strukturdaten sind Datengraphen. Mittels Graphentransformation können analog zur matrixbasierten Analyse indirekte Zusammenhänge abgeleitet und strukturelle Merkmale berechnet werden. Der *Engineering Intelligence* Ansatz baut auf

die Bildung und Analyse von Strukturmodellen durch Graphen auf und stellt ein vielversprechendes Konzept dar, mit dem Zusammenhänge in Entwicklungsprojekten auf Basis vorhandener Daten flexibel modelliert und umfassend analysiert werden können.

### **Fazit**

Die zielgerichtete Planung der Koordination in Entwicklungsprojekten setzt ein tiefgreifendes Verständnis über Abhängigkeiten voraus, die zu Abstimmungsbedarfen führen. Für eine systematische Berücksichtigung der Abhängigkeiten ist es hilfreich, typische Arten und Charakteristika von Abhängigkeiten differenzieren zu können, um entsprechende Abstimmungsbedarfe in die Projektplanung einfließen zu lassen. Koordination ist vor allem dann notwendig, wenn ein Abstimmungsbedarf wahrscheinlich nicht von alleine adressiert wird. In der Literatur stehen zwar Sammlungen über mögliche Koordinationsmechanismen zur Verfügung, es besteht aber kein Problembewusstsein über die grundsätzlichen Herausforderungen der Koordination.

Überdies existiert derzeit kein durchgängiger Ansatz, der die projektspezifische Identifikation von Koordinationsbedarfen auf Basis von vorhandenen Daten unterstützt. Gleichzeitig deuten vorhandene Ansätze zur Strukturanalyse von Entwicklungszusammenhängen darauf hin, dass Abstimmungsbedarfe aus technischen Zusammenhängen auf Produktebene abgeleitet werden können. Es wird ein Ansatz benötigt, der daraufhin die Relevanz ermittelter Abstimmungsbedarfe für die Koordinationsplanung bewertet und damit die Ableitung von Koordinationsmaßnahmen unterstützt.

## 4. Erweitertes Verständnis über Abhängigkeiten und Koordination

*Dieses Kapitel baut auf den Recherchen zum Stand der Technik auf und fasst Erkenntnisse über unterscheidbare Arten von Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten, über mögliche Charakteristika und Messgrößen für Abhängigkeiten und über grundlegende Herausforderungen der Koordination zusammen. Die Ausführungen zielen auf die Beantwortung der Forschungsfragen FF1 und FF4 ab und sollen ein erweitertes Verständnis über Abhängigkeiten und Koordination schaffen, um die Koordinationsplanung in komplexen Entwicklungsprojekten indirekt zu unterstützen.*

### 4.1 Arten von Abhängigkeiten

Für ein detaillierteres Verständnis des Phänomens *Abhängigkeit* werden unterschiedliche Arten von Abhängigkeit unterschieden (vgl. Kapitel 3.2.1). Ein verbessertes Verständnis soll ein gesteigertes Bewusstsein für Abhängigkeiten ermöglichen. Außerdem wird angenommen, dass für jede Art von Abhängigkeit unterschiedliche Koordinationsmaßnahmen passend sind (vgl. Malone & Crowston [1994, S. 91]). In der Literatur sind Abhängigkeitsarten nicht einheitlich kategorisiert. Aufbauend auf den unterschiedlichen Sichtweisen in der Literatur (vgl. Tabelle 3-5) wird eine überarbeitete Einteilung mit Bezug auf daraus resultierende Abstimmungsbedarfe erarbeitet.

Der Definition von Abhängigkeit in dieser Arbeit folgend, werden für eine Kategorisierung denkbare Abhängigkeiten im Projektsystem betrachtet, die zu Abstimmungsbedarf führen. Dafür wurde ergänzend zur Literaturanalyse eine Praxisstudie im Rahmen eines Studienarbeitsprojekts (siehe PE-Steininger 2016) in Kooperation mit einer Entwicklungsabteilung für Fahrerassistenzsysteme (FAS) bei einem führenden Automobilhersteller in Deutschland durchgeführt. Die Praxisstudie zielte darauf ab, Beispiele für stattfindende Interaktion zwischen den Abteilungen zu sammeln, um damit auf Abhängigkeiten rückzuschließen. Mittels strukturierter Interviews mit acht Projektleitern der betrachteten FAS-Entwicklungsabteilung wurden deren Aktivitäten und Schnittstellen mit anderen Abteilungen systematisch erfasst.

Die Erfassung wurde dahingehend systematisiert, dass anhand des Unternehmens-Organigramms jede Abteilung betrachtet wurde. Für jede identifizierte Abstimmung wurden die Gründe für die Notwendigkeit der Interaktion gesammelt. Insgesamt wurden 77 Schnittstellen identifiziert, wovon sieben Schnittstellen innerhalb der FAS-Entwicklungsabteilung, 38 Schnittstellen innerhalb der technischen Entwicklung und 32 Schnittstellen zu Abteilungen außerhalb der technischen Entwicklung bestehen.

Durch Gegenüberstellung der gesammelten Schnittstellen mit den in der Literatur identifizierten Kategorien wird ein überarbeitetes Kategorisierungsschema für Entwicklungsprojekte herausgearbeitet. Es muss zwar davon ausgegangen werden, dass die Schnittstellensammlung nicht repräsentativ ist. Sie gibt jedoch einen wertvollen Einblick in die Unterschiedlichkeit

von Abhängigkeitsbeziehungen in Entwicklungsprojekten in der Praxis. Das Kategorisierungsschema ist in Tabelle 4-1 dargestellt und wird im Folgenden näher erläutert.

*Tabelle 4-1 Kategorisierung von Abhängigkeitsarten in Entwicklungsprojekten und resultierende Arten der Interaktion in Anlehnung an die Literatur und Beispiele aus der industriellen Praxis.*

| Kategorien  | Beispiele aus Fallstudie   |
|---|--|
| <b><u>Technisch-logische Abhängigkeit</u></b>               |  |
| <b>Ablaufabhängigkeit</b> – Strikte Präzedenz: →            | Technische Produktschnittstellen zu Partnersteuergeräten (Daten, Verkabelung).   |
| Finish-to-Start   | Zusammenhänge über Eigenschaften bzgl. Aerodynamik, Klimatisierung und Thermomanagement sowie Design oder Fußgängerschutz.   |
| Sequenz, Produzent-Konsument-Beziehung                      | Vorschriften der Norm ISO 26262; Vorschriften der Rechtssicherheit; Ländervorschriften (z. B. Frequenzzulassungen).  |
| Funktionsabhängigkeit                                       |  |
| Produktabhängigkeit (beinhaltet<br>Vorschriftsabhängigkeit) |  |
| <b>Ablaufabhängigkeit</b> – Orientierende Präzedenz: ↔      | Abstimmungen zwischen Serienentwicklung und anderen Unternehmensbereichen wie z. B. Vorentwicklung; Konzeptentwicklung; Vertrieb/Produktmarketing (Korrektur der Marketingtexte, Nennung der Einbauraten); Produktion und Beschaffung; Kundendienst. |
| Verhandlung; aufeinander abstimmen                          |  |
| Funktionsabhängigkeit                                       |  |
| Produktabhängigkeit (beinhaltet<br>Vorschriftsabhängigkeit) |  |
| <b>Strukturabhängigkeit</b> – Dekomposition →               | Abstimmungen aufgrund eines markenübergreifenden Plattformkonzepts.  |
| <b>Strukturabhängigkeit</b> – Kommunalität <sup>25</sup> ↔  |  |
| <b><u>Organisatorisch-logische Abhängigkeit</u></b>         |  |
| Führungsabhängigkeit/ Weisungsabhängigkeit →                | Produktmanager überprüft, was getan wird.<br>Funktionsmanager prüft, wie es getan wird.<br>Projektleiter überprüft Entwickler, Entwicklungsdienstleister und Lieferanten.  |
| <b><u>Ressourcenabhängigkeit</u></b>                        | Budgetverteilung   |
| Geteilte (rivale) Ressourcen → / ↔                          | Begrenzt verfügbare Erprobungsfahrzeuge  |
| Gleichzeitigkeitsbedingung → / ↔                            |  |
| <b><u>Soziale Abhängigkeit</u></b>                          | -  |
| Psychologische Schnittstellen                               |  |
| Soziale Kontakte  |  |

Arten der Interaktion: Einseitige Abhängigkeit (→); Gegenseitige Abhängigkeit (↔)

#### 4.1.1 Technisch-logische Abhängigkeit

Die technisch-logischen Abhängigkeiten werden weiter in die Kategorien **Ablaufabhängigkeit** und **Strukturabhängigkeit** unterteilt. Die Ablaufabhängigkeit hat insofern einen primär

<sup>25</sup> Kommunalität bezeichnet hier die Gleichheit von Systembestandteilen innerhalb einer Produktfamilie. Vgl. auch Gebhart *et al.* [2016, S. 122-142]

zeitlichen Bezug, dass sie sich auf Prozessebene als logische Reihenfolge der Prozessschritte äußert. Diese Präzedenz existiert jedoch in unterschiedlichen Abstufungen. Eine **strikte Präzedenz** als einseitige Abhängigkeit besteht dann, wenn der Vorgängerschnitt eine Information bzw. ein Ergebnis erzeugt, das der nachfolgende Schritt als Input benötigt (Sequenz) und selbst keinen Einfluss darauf hat. Der Informationsfluss muss dabei nicht zwangsläufig diskret sein (Finish-to-Start), sondern kann auch kontinuierlich stattfinden (iterative Informationsübergabe). Auf Organisationsebene impliziert die Präzedenz, wer Produzent und wer Konsument ist (Produzent-Konsument-Beziehung). Häufig handelt es sich jedoch nicht um eine einseitige Abhängigkeit sondern um eine wechselwirkende Abhängigkeit (vgl. *engl. interdependence* bzw. *mutual dependence* nach Moser & Wood [2015, S. 201-203]). Die Prozessschritte sind gekoppelt, überschneiden sich zeitlich und iterieren, bis ein für beide Seiten zufriedenstellendes Ergebnis erreicht ist [Eppinger & Browning 2012, S. 134]. Dieser Abhängigkeitstyp wird hier auch als **orientierende Präzedenz** bezeichnet, weil es in der Regel einen dominanteren Prozessschritt (tendenziell Produzent) und einen weniger dominanten Prozessschritt (tendenziell Konsument) gibt.

Ablaufabhängigkeiten beziehen sich entweder auf **technische Produktschnittstellen** (bezogen auf Geometriebedingungen oder kybernetische Flüsse; vgl. Kapitel 2.2.3), **Eigenschaftszusammenhänge** (Eigenschaften, die mehrere Teilsystemumfänge betreffen<sup>26</sup>) oder **notwendige Interaktionen zwischen Unternehmensfunktionen** (z. B. Entwicklung – Produktion).

Eine Strukturabhängigkeit liegt vor, wenn eine logische Beziehung zwischen zwei Entwicklungstätigkeiten besteht, die auf strukturelle Zusammenhänge im Produktsystem zurückgeführt werden kann. Durch die **Dekomposition** eines zu entwickelnden Systems in Teilsysteme entstehen einseitige Abhängigkeitsbeziehungen zwischen Tätigkeiten auf Systemebene und Tätigkeiten auf Teilsystemebene. Die Dekomposition führt außerdem zu wechselseitigen Strukturabhängigkeiten zwischen Entwicklungsaktivitäten, die unterschiedliche Teilsysteme eines übergeordneten Systems betreffen. Eine weitere Form wechselseitiger Strukturabhängigkeiten zwischen Entwicklungsaktivitäten entsteht durch **Kommunalität**. Wenn die Verwendung von Gleichteilen angestrebt wird, muss eine Abstimmung bezüglich der Systemumfänge stattfinden, die diese beinhalten. Das kann sogar projektübergreifend der Fall sein.

#### 4.1.2 Organisatorisch-logische Abhängigkeit

Die organisatorisch-logische Abhängigkeit beeinflusst ähnlich wie die technisch-logische Abhängigkeit zeitliche und inhaltliche Aspekte auf Prozess- und Organisationsebene. Sie adressiert die Abhängigkeit von formellen **Genehmigungen** und **Freigaben** in Bezug auf Prozessschritte, wobei sich die Abhängigkeit letztlich vorwiegend auf Organisationsebene manifestiert.

---

<sup>26</sup> Hierunter fallen z. B. auch gesetzliche Anforderungen und Vorschriften.

### 4.1.3 Ressourcenabhängigkeit

Die Ressourcenabhängigkeit hat vor allem eine zeitliche Dimension. Wobei es bei **rivalen Ressourcen** bei der notwendigen Interaktion um die Aushandlung der Ressourcenzuordnung (über die Zeit) geht. In der Literatur wird zusätzlich der Fall einer **Gleichzeitigkeitsbedingung** zwischen zwei oder mehreren Aktivitäten unterschieden, die auf eine gleichzeitig einzusetzende Ressource zurückgeführt werden kann.

In der weiteren Betrachtung wird die Ressourcenabhängigkeit ausgeklammert. Koordination im Zusammenhang mit rivalen Ressourcen wird in der Regel mit dem Begriff „Resource-constrained project scheduling“ (siehe z. B. auch Critical Chain Project Management, Kapitel 3.1.4) bezeichnet und macht einen umfangreichen eigenen Forschungsbereich aus (z. B. Artigues *et al.* [2008]; Hartmann [1999]; Kolisch [1995]; Browning & Yassine [2015, S. 4-5] liefern einen detaillierteren Überblick über relevante Literatur).

### 4.1.4 Soziale Abhängigkeit

In der Literatur ist vereinzelt auch von interpersonellen Zusammenhängen wie **psychologischen Schnittstellen** [Lang & Madnick 1993, S. 11] oder **sozialen Kontakten** [Worren 2012, S. 216] die Rede. Diese stellen jedoch keine Ursache für Abstimmungsbedarf dar, sondern eher einen Umstand, der bei der Koordination berücksichtigt werden sollte.

## 4.2 Charakteristika und Messgrößen zur Beschreibung von Abhängigkeiten

Die Untersuchung von Abhängigkeitsarten sensibilisiert auf übergeordneter Ebene und schafft ein Bewusstsein für Abhängigkeiten. Für ein effektives Management von Abhängigkeiten ist zusätzlich zum Bewusstsein ein tieferes Verständnis der Abhängigkeiten notwendig. Dafür werden in diesem Kapitel mögliche Charakteristika und entsprechende Messgrößen zur detaillierten Beschreibung von Abhängigkeiten aufgezeigt. Die Grundlagen für diese Betrachtungen wurden im Rahmen eines Studienarbeitsprojekts erarbeitet (siehe PE-Starke 2015)<sup>27</sup>.

Basierend auf einer systematischen Literaturrecherche wurde eine konsolidierte Sammlung möglicher Charakteristika und Messgrößen von Abhängigkeiten erstellt. Dafür wurde Literatur aus den Bereichen Portfoliomanagement, Prozessmanagement, Komplexitätsmanagement, Soziologie und Psychologie (bzgl. Leistung in Teams) gesichtet. In Diskussion mit den am Studienarbeitsprojekt beteiligten Wissenschaftlern wurden Charakteristika und Messgrößen aus der Literatursammlung ausgewählt und ergänzt, die für die Charakterisierung von Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten relevant sind. In einem zweiten Schritt wurde eine Studie durchgeführt, die eine Einschätzung der Eignung der Charakteristika zur Beschreibung von Abhängigkeiten ermöglicht. In der Studie bewerteten insgesamt 139 Teilnehmer eines Systems Design & Management-Kurses am MIT fünf verschiedene Beispiele von Abhängigkei-

---

<sup>27</sup> Die Studienarbeit wurde in Kooperation mit Wissenschaftlern des Sociotechnical Systems Research Center (SSRC) am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, USA betreut. Eine gemeinsame Überarbeitung und Aufbereitung der Ergebnisse ist in Chucholowski *et al.* [2016c] veröffentlicht und wird im Folgenden zusammengefasst.

ten innerhalb eines Beispielprojekts auf Basis der erarbeiteten Messgrößen. Dabei gaben die Teilnehmer in einem Fragebogen mit ein bis zwei Fragen je Messgröße eine Einschätzung zur Quantifizierung einer der fünf Beispielabhängigkeiten an. Die Berechnung des Koeffizienten Alpha nach Cronbach [1951] (zitiert nach Cortina [1993]) für die Bewertungen ermöglicht es einzuschätzen, ob die Messgrößen für ein Charakteristikum das gleiche Phänomen messen. Mittels einer Faktoranalyse werden Messgrößen identifiziert, die sich nicht zur Bewertung eines Charakteristikums zu eignen scheinen. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die erarbeitete Sammlung von Charakteristika und Messgrößen. Darin ist ebenfalls die Bewertbarkeit angegeben, das heißt ob ein Charakteristikum sich im Rahmen der Studie mittels der erarbeiteten Messgrößen verlässlich (d. h. Cronbach's alpha größer 0,6) bzw. eingeschränkt verlässlich (d. h. Cronbach's alpha zwischen 0,5 und 0,6) bewerten lässt. Die Tabelle zeigt außerdem, welche Messgrößen bei der Datenanalyse ausgeschlossen wurden (Eignung), um die Bewertbarkeit eines Charakteristikums mittels der verbleibenden Messgrößen zu verbessern. Die Angaben beziehen sich lediglich auf die Datengrundlage der Studie und können nicht verallgemeinert werden (vgl. Diskussion in Chucholowski *et al.* [2016c]). Für das Kriterium Bewusstsein sind keine Messgrößen definiert, weil eine Abhängigkeit überhaupt erst bewertet werden kann, sobald sie bekannt ist.

Um zusätzlich überprüfen zu können, ob ein gesteigertes Verständnis über mögliche Charakteristika von Abhängigkeiten einen positiven Effekt bei der Planung eines Entwicklungsprojekts erzielt, wurden die oben genannten Teilnehmer in eine Experimentiergruppe und eine Kontrollgruppe eingeteilt. Beide Gruppen hatten den Auftrag, ein Projekt mit einem gegebenen Projektplan bezüglich Gesamtdauer und Gesamtkosten zu optimieren. Die Experimentiergruppe erhielt vor der Aufgabe eine theoretische Einführung über Projektabhängigkeiten und deren Charakteristika. Letztlich konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Optimierungsergebnissen von Arbeitsgruppen der Experimentiergruppe und von Arbeitsgruppen der Kontrollgruppe identifiziert werden. Somit konnte der Nutzen eines erhöhten Verständnisses in dem beschriebenen Studienkontext nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 4-2 Charakteristika und Messgrößen für Abhängigkeiten in Anlehnung an Chucholowski et al. [2016c].

| Bewertbarkeit | Charakteristikum   | Messgrößen  | Eignung          |
|---------------|--|---|------------------|
| ⊖             | <b>Bewusstsein</b> ( <i>engl. awareness</i> )<br>Der Umfang, zu dem eine Abhängigkeit im Projekt bekannt ist.  | Keine Messgrößen definiert.   |                  |
| ⊖             | <b>Nähe</b> ( <i>engl. closeness</i> )<br>Der Grad, zu dem Veränderungen einer Entität unmittelbare Auswirkungen auf eine andere Entität haben.                        | D1 Komponentenzusammenhänge im Produkt<br>D2 Flexibilität des Budgets<br>D3 Anzahl der Aktivitäten, die Daten verändern   | ⊖<br>✓<br>✓      |
| ⊖             | <b>Grad der Wechselwirkung</b> ( <i>engl. degree of mutuality</i> )<br>Der Grad, zu dem zwei Entitäten gegenseitig voneinander abhängig sind.                          | M1 Unterschiede in der Menge voneinander benötigter Informationen<br>M2 Unterschiede der Prioritäten<br>M3 Unterschiede der Datennutzung                                | ✓<br>⊖<br>✓      |
| ✓             | <b>Feedbackmechanismus</b> ( <i>engl. feedback mechanism</i> )<br>Der Weg, wie die Interaktion zwischen abhängigen Elementen aussieht.                                 | F1 Frequenz geplanten Informationsaustauschs<br>F2 Frequenz geplanter Budget-Reviews<br>F3 Anzahl, wie oft Daten benötigt werden  | ✓<br>⊖<br>✓      |
| ✓             | <b>Konsequenz</b> ( <i>engl. impact</i> )<br>Der Grad, zu dem abhängige Entitäten betroffen sind, wenn die Abhängigkeit nicht berücksichtigt wird.                     | I1 Anteil der Entität, der von Input abhängt<br>I2 Notwendige Nacharbeit bei falschem Input<br>I3 Vorhandene Puffer<br>I4 Zusammenhänge zwischen Produktspezifikationen | ✓<br>✓<br>⊖<br>✓ |
| ✓             | <b>Verständnis</b> ( <i>engl. satisfaction criteria</i> )<br>Das Wissen und das Einverständnis darüber, was notwendig ist, um die Abhängigkeit adäquat zu adressieren. | C1 Verständnis darüber, was notwendig ist, um die Abhängigkeit zu berücksichtigen<br>C2 Einigkeit darüber, was notwendig ist, um die Abhängigkeit zu berücksichtigen    | ✓<br>✓           |
| (✓)           | <b>Stärke</b> ( <i>engl. strength</i> )<br>Die Menge notwendiger Interaktion, um die Abhängigkeit zu berücksichtigen.  | S1 Menge auszutauschender Information<br>S2 Variabilität der Kosten<br>S3 Anzahl gemeinsamer Komponenten<br>S4 Grad der Gleichzeitigkeit                                | ✓<br>✓<br>✓<br>⊖ |
| (✓)           | <b>Dringlichkeit</b> ( <i>engl. urgency</i> )<br>Die zeitliche Kritikalität, um die Abhängigkeit zu berücksichtigen.   | U1 Zeitliche Flexibilität von Meilensteinen<br>U2 Varianz der Dauer von Aktivitäten   | ⊖<br>✓           |

✓: Bewertbar/geeignet; (✓): Eingeschränkt bewertbar; ⊖: Nicht bewertbar/ungeeignet

### 4.3 Grundlegende Herausforderungen der Koordination

Während bestehende Abhängigkeiten im Projekt Bedarfe für Koordination darstellen, gibt es gleichzeitig unterschiedliche Herausforderungen, die eine effiziente und erfolgreiche Koordination erschweren. Basierend auf einer systematischen Literaturrecherche im Rahmen eines Studienarbeitsprojekts (siehe PE-Lehmer 2015) konnten insgesamt sechs grundlegende Herausforderungen identifiziert werden (Abbildung 4-1). Ein wichtiger Ausgangspunkt für die Recherchen ist dabei das Problemprofil der verteilten Produktentwicklung nach Gierhardt

[2002, S. 73]. Die Einteilung der Herausforderungen wurde in Chucholowski *et al.* [2016b] veröffentlicht und wird im Folgenden zusammengefasst.

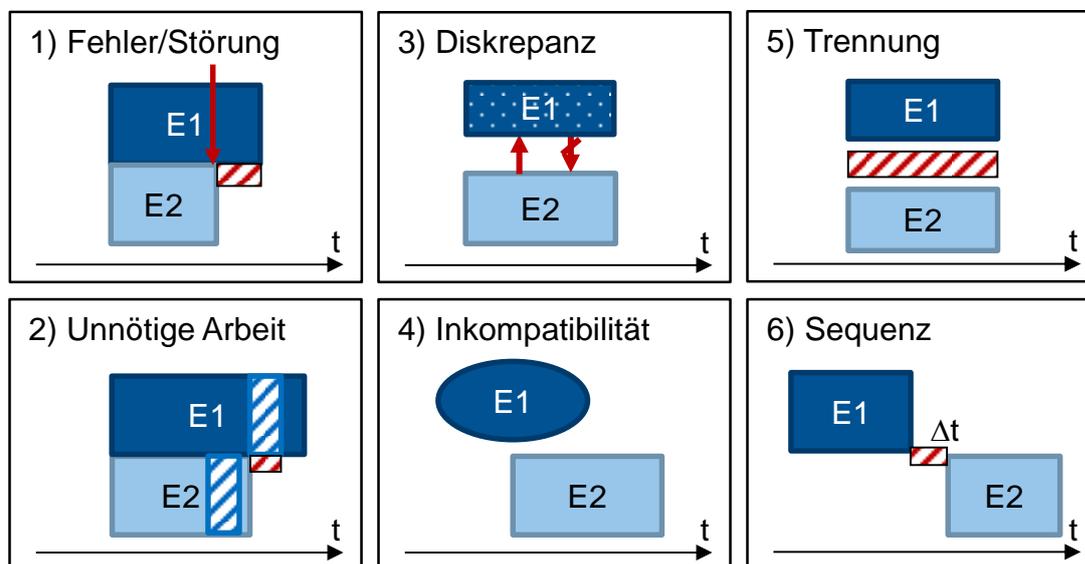


Abbildung 4-1 Sechs in der Literatur beschriebene Herausforderungen der Koordination (nach Chucholowski *et al.* [2016b, S. 1466, Figure 2]).

In dieser Arbeit wird Koordination immer auf Prozess- und auf Organisationsebene betrachtet. Die identifizierten Herausforderungen äußern sich teilweise jedoch auch in Bezug auf Entwicklungswerkzeuge (Software, Hardware) und auf das Produkt (Komponenten, Produktdaten). Insofern stehen die Platzhalter E1 und E2 in Abbildung 4-1 für Prozesse, Organisationseinheiten, Werkzeuge oder Produktelemente.

### 1) Fehler/Störung

Fehler oder Störungen treten auf, wenn durch interne oder externe Einflussfaktoren eine Veränderung im Projekt ausgelöst wird, die nicht vorhergesehen werden konnte [Meyer *et al.* 2002, S. 62]. Dies stellt eine Herausforderung für eine erfolgreiche Koordination dar, wenn für E1 nicht bekannt ist, dass E2 von der Veränderung betroffen ist.

### 2) Unnötige Arbeit

Unnötige Arbeit bezieht sich auf Situationen, in denen Informationen oder Ergebnisse entweder doppelt, in falschem Umfang (anders als benötigt, was zu Nacharbeit führt) oder in zu großem Umfang (zu detailliert, höhere Qualität als benötigt) erzeugt werden. Gründe für das Entstehen unnötiger Arbeit können eine unzureichende Planung oder Dokumentation sein.

### 3) Diskrepanz

Eine Diskrepanz zwischen zwei Projektentitäten wird als einseitiger Mangel einer Abstimmung definiert, der eine Fehlinterpretation erzeugt. Dies kommt vor, wenn zum Beispiel eine von E2 an E1 korrekt übermittelte Information von E1 falsch interpretiert wird, weshalb die

Reaktion anders ausfällt als von E2 erwartet [Clark 1996, S. 98-113]. Folgende Beispiele sind in Chucholowski *et al.* [2016b] ursprünglich der Kategorie Trennung zugeordnet, sie sind jedoch primär auf eine Diskrepanz zurück zu führen:

- **Wissenslücken:** Unterschiedliche Wissensgrundlagen bestehen aufgrund verschiedener beteiligter Disziplinen, durch starke Spezialisierung auf Teilsysteme eines Gesamtsystems, oder generell wegen fehlender Informationen [Bréchet, Y. J. M. 2001; Carroll *et al.* 2003, S. 2; Clark 1996; Spafford 2003; Tristl *et al.* 2013, S. 1028-1029].
- **Kulturelle Unterschiede:** Auch kulturelle Unterschiede führen zu unterschiedlichen Arbeitsweisen (z. B. unterschiedliche Meeting-Kulturen), die eine gewisse Diskrepanz verursachen können [Carroll *et al.* 2003; Clark 1996, S. 108-112; Huang & Trauth 2008, S. 8-9; Lientz 2013, S. 413-420]. In diese Subkategorie können auch sprachliche Differenzen gezählt werden.
- **Verhaltensunterschiede:** Eng verwandt mit kulturellen Unterschieden sind generelle Verhaltensunterschiede, die durch Alters-/ Generationsunterschiede, unterschiedliche Bildungsstände oder fehlende Sozialkompetenzen entstehen [Carroll *et al.* 2003, S. 615].
- **Kapazitätsunterschiede:** Gaul [2001, S. 104] thematisiert, dass Kapazitätsunterschiede eine erfolgreiche Abstimmung einschränken können, wenn eine erhöhte Arbeitslast bei einer Partei zu Differenzen in der Priorisierung und der zeitlichen Abarbeitung zwischen zwei Projektelementen führen.

#### 4) Inkompatibilität

Die Inkompatibilität ist ähnlich zur Diskrepanz und bezieht sich primär auf Entwicklungswerkzeuge, die nicht kompatibel zueinander sind und deshalb keine Daten austauschen können. Ein Beispiel dafür könnte ein spezielles Simulationsprogramm sein, das die Geometriedaten aus einem CAD-System nicht übernehmen kann. Domänenspezifische Standards und Werkzeuge, wie zum Beispiel unterschiedliche Standardprozesse in unterschiedlichen Abteilungen oder unterschiedliche Werkzeuge zur Entwicklung zusammengehörender Subsysteme erschweren die Abstimmung [Tang 1991; Tristl *et al.* 2013]. Diese nach Chucholowski *et al.* [2016b, S. 1467] ursprünglich der Gruppe Trennung zugeordnete Herausforderung wird hier ebenfalls als Inkompatibilität interpretiert. Darüber hinaus können auch Personen, die wenig gemeinsam haben, als inkompatibel bezeichnet werden [Ickes 1985].

#### 5) Trennung

Die eindeutigste Herausforderung für effiziente und erfolgreiche Koordination wird als Trennung überschrieben, wobei weitere Subkategorien der Trennung unterschieden werden können. Insgesamt führt eine Trennung dazu, dass die Abstimmung beeinträchtigt ist. So kann davon ausgegangen werden, dass eine **örtliche Trennung** (z. B. aufgrund unterschiedlicher Büros oder verteilter Entwicklung) tendenziell zu einer Abnahme informeller Kommunikation und regelmäßiger Abstimmung führt [Carroll *et al.* 2003, S. 2; Lientz 2013, S. 223; Salas 2013, S. 422; Tang 1991]. Darüber hinaus kann eine geringe **Intensität der Zusammenarbeit** als Zeichen dafür gesehen werden, dass eine erfolgreiche Koordination gehemmt ist [Bar-El & Malul 2008]. Zuletzt werden **hierarchische Unterschiede** als Form der Trennung

gesehen [de Corbière & Rowe 2013; Malone & Crowston 1994]. Beispielsweise kann die Abstimmung zwischen zwei Personen, die unterschiedlichen Hierarchieebenen angehören, durch ungleichmäßige Entscheidungskompetenzen erschwert sein. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass die Kommunikation zwischen einer Mitarbeiterin bzw. einem Mitarbeiter mit einer hierarchisch höher gestellten Person schwerfälliger ist als die, zwischen zwei Personen gleicher hierarchischer Position.

## 6) Sequenz

Die Sequenz entspricht einer zeitlichen Trennung. Sie wird hier als separate Herausforderung aufgeführt, weil sie sich weniger auf die Art und Weise als auf den Zeitpunkt einer Abstimmung bezieht. Die zeitliche Trennung resultiert aus der Nutzung exklusiv verfügbarer Ressourcen [Carroll *et al.* 2003; de Corbière & Rowe 2013] oder auch bei der Zusammenarbeit über unterschiedliche Zeitzonen.

Die literaturbasierte Sammlung der Herausforderungen wurde mit einem Industriepartner diskutiert (vgl. Chucholowski *et al.* [2016b]). In dessen Entwicklungskontext spielen die Herausforderungen bezüglich Trennung, Sequenz und Fehler/Störungen die größte Rolle. Diskrepanz und Inkompatibilität werden dagegen nicht als Herausforderungen wahrgenommen. Der Industriepartner betont, dass vor allem Veränderungen während des Projekts wie zum Beispiel Anforderungsänderungen häufig zu Abstimmungsproblemen führen. Weitere Beispiele sind Veränderungen der Projektpläne oder technische Neuerungen, die nachträglich integriert werden sollen. Eine **zusätzliche Herausforderung** stellt die **Koordination über mehrere Entwicklungsprojekte** hinweg dar, die der Kategorie Trennung zugeordnet werden kann. Der Abstimmungsbedarf entsteht hier aufgrund produktübergreifende Verwendung gemeinsamer Komponenten (vgl. Abhängigkeitsart Kommunalität in Kapitel 3.2.1).



## 5. Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung

*In diesem Kapitel wird der entwickelte Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung vorgestellt. Dafür werden zunächst Anforderungen an den Unterstützungsansatz formuliert. Anschließend wird die Konzeption eines Basis-Metamodells als Grundlage für den Unterstützungsansatz erläutert. Zur Vorstellung des Vorgehens wird schließlich zuerst ein Gesamtüberblick gegeben, bevor die Teilschritte detaillierter beleuchtet werden. Die theoretische, allgemeingültige Beschreibung des Vorgehens wird in den Teilschritten durch ein illustratives Beispiel ergänzt. Abschließend wird der Ansatz kritisch diskutiert und Möglichkeiten zur Erweiterung des Ansatzes aufgezeigt.*

### 5.1 Anforderungen an den Ansatz

Die Koordination in komplexen Entwicklungsprojekten stellt für Projektmanagerinnen und -manager eine große Herausforderung dar. Es ist schwierig den Überblick über die Zusammenhänge zu behalten und voneinander abhängige Entwicklungsaktivitäten zu planen sowie einen effektiven und effizienten Informationsaustausch zwischen Projektbeteiligten zu gewährleisten. Der Lösungsansatz zur Unterstützung der Koordinationsplanung soll folgenden Anforderungen gerecht werden:

- **A1 Stakeholder:** Hauptanwender des Unterstützungsansatzes sind Personen, die mit der übergeordneten Planung und Kontrolle eines Entwicklungsprojekts betraut sind. Sie sind dafür verantwortlich den Terminplan und die Teamstrukturen so zu gestalten, dass das Projekt in möglichst kurzer Zeit, zu geringen Kosten und mit hoher Ergebnisqualität durchgeführt werden kann. In der Regel handelt es sich hierbei um die Projektmanagerin bzw. den Projektmanager oder die technische Projektleiterin bzw. den technischen Projektleiter.
- **A2 Einbettung in die Praxis:** Der Ansatz soll praxisorientiert sein, das heißt sich an real verfügbaren Daten orientieren und in der alltäglichen Anwendung nur geringen Zusatzaufwand erzeugen. Die Daten sollen dafür nicht in einem zusätzlichen System gepflegt werden müssen, sondern aus vorhandenen IT-Systemen genutzt werden.
- **A3 Kompatibilität bzw. Flexibilität:** Die vorhandenen Daten und Informationen bezüglich Entwicklungsprojekten unterscheiden sich von Unternehmen zu Unternehmen sehr stark. Sie unterscheiden sich sowohl im Detailgrad als auch im Betrachtungsumfang. Der Ansatz muss einen flexiblen Umgang mit verschiedenen Detailgraden und Betrachtungsumfängen ermöglichen, um die im Anwendungsfall vorliegende Datenstruktur vollständig abbilden zu können. Das ist auch deshalb notwendig, damit für Anwender kein „Umdenken“ notwendig ist. Das erhöht die Akzeptanz und reduziert den Anwendungsaufwand.
- **A4 Unterstützungsbeitrag:** Die Analyse komplexer Projekte kann voraussagend, diagnostisch oder retrospektiv sein [Marle & Vidal 2016, S. 85]. Der hier angestrebte Unterstützungsbeitrag hat diagnostischen Charakter. Der Ansatz soll bezüglich einer Ist-

Situation Informationen aus einer Fülle vorhandener Daten greifbar machen und so zu mehr Transparenz und Überblick führen, um Handlungsbedarfe zu identifizieren und geeignete Maßnahmen ableiten zu können. Der Fokus liegt hierbei auf der Ermittlung von Koordinationsbedarfen, die aus Abhängigkeiten im Produktsystem resultieren, weil diese die Hauptursache für notwendige Abstimmung in einem Entwicklungsprojekt darstellen [Sosa *et al.* 2004, S. 1675].

- **A5 Engineering Intelligence:** Das Grundkonzept des Unterstützungsansatzes soll sich an der Idee der *Engineering Intelligence* (vgl. Kapitel 3.4) orientieren. Die Modellierung von Entwicklungsprojekten in einem integrierten Projektgraphen eröffnet umfassende Analysemöglichkeiten mittels frei definierbarer Algorithmen und Regeln zur Graphentransformation.
- **A6 Erweiterbarkeit:** Neben der Koordinationsplanung gibt es eine Vielzahl anderer nützlicher Möglichkeiten zur Analyse von Projektdaten. Der Ansatz soll deshalb leicht erweiterbar sein, um weitere anwendungsspezifische Analysen der Projektdaten zu ermöglichen.

Diese Anforderungen sind handlungsleitend für die Entwicklung des Unterstützungsansatzes und werden in Kapitel 6.5.1 diskutiert.

## 5.2 Konzeption eines Basis-Metamodells für Projektsysteme

Für die Modellierung eines Projektgraphen ist es notwendig ein Metamodell zu definieren (vgl. Kapitel 2.4.2). Nach Anforderung A2 soll das Metamodell ermöglichen, vorhandene Daten in einem Unternehmen ohne aufwändige Aufbereitung in einen Projektgraphen zu überführen. Nachdem sich die vorliegende Repräsentation der Daten von Unternehmen zu Unternehmen stark unterscheidet, kann es kein allgemeingültiges Metamodell geben. Trotzdem soll hier ein Basis-Metamodell vorgestellt werden, das darauf abzielt eine Grundstruktur für anwendungsspezifisch definierte Metamodelle zu bieten. Das Basis-Modell dient als Ausgangspunkt, wobei bestimmte Element- oder Relationstypen weggelassen werden können, wenn dazu keine Daten vorhanden sind oder nur mit Mühe bereitgestellt werden können. Andererseits können auch Element- oder Relationstypen hinzugefügt werden, die dann für die Nutzung anwendungsspezifisch definierter Analysealgorithmen verwendet werden können.

Das Basis-Metamodell wurde primär literaturbasiert entwickelt<sup>28</sup>. Die Element- und Relationstypen orientieren sich dabei an den Daten, die üblicherweise in unterschiedlichen Modellen in der Entwicklung vorkommen (vgl. Kapitel 3.1). Der erste Entwurf des Metamodells ist in Chucholowski & Lindemann [2015] veröffentlicht. Für eine Weiterentwicklung dienten mehrere Fallbeispiele, um einerseits in der Praxis vorhandene und andererseits für die Praxis relevante Element- und Relationstypen zu identifizieren. Folgende Fallbeispiele flossen in die Weiterentwicklung des Basis-Metamodells ein:

- Studienarbeitsprojekt in Kooperation mit der Entwicklungsabteilung für Finanztrainings bei der Siemens AG (PE-Hartmann 2016).

---

<sup>28</sup> Im Studienarbeitsprojekt PE-Vigne 2014 wurde Vorarbeit dazu geleistet.

- Studienarbeitsprojekt in Kooperation mit dem studentischen Entwicklungsteam TUfast Eco-Team (PE-Vollmann 2016).
- Studienarbeitsprojekt in Kooperation mit einer Entwicklungsabteilung bei der iwis Motorsysteme GmbH und Co. KG (PE-Ralser 2016).

In den weiteren Ausführungen werden die definierten Typen bzw. Klassen des Metamodells durch folgende Schreibweise kenntlich gemacht<sup>29</sup>:

- `:Knotenklasse` für Elementtypen;
- `:-UngerichteteKantenklasse-` für ungerichtete Relationstypen;
- `:-GerichteteKantenklasse->` für gerichtete Relationstypen.

### 5.2.1 Überblick über das Basis-Metamodell

Ein generisches Metamodell als Basis für anwendungsspezifische Metamodelle wird durch die Nutzung des Vererbungsprinzips (vgl. Kissel [2014, S. 86]) ermöglicht. Das heißt, dass Attribute einer übergeordneten Klasse (Element- oder Relationstyp) an eine untergeordnete Klasse vererbt werden können. Das Basis-Metamodell für das Projektsystem besteht in Anlehnung an Browning *et al.* [2006] zunächst aus den drei Knotenklassen `:Produktsystem`, `:Prozesssystem` und `:Organisationssystem`. Jede Klasse kann in weitere Subklassen unterteilt werden, die für die Modellierung des Projektsystems genutzt werden kann, sobald Daten dafür zur Verfügung stehen. Sind die Daten nicht im erforderlichen Detailgrad für untergeordnete Klassen vorhanden, kann eine übergeordnete Klasse zur Modellierung verwendet werden. Abbildung 5-1 gibt einen schematischen Gesamtüberblick über das Basis-Metamodell und die Klassenhierarchie der Knoten der drei Hauptssysteme. Unterschiedliche Kantenklassen verknüpfen die Knoten der Hauptssysteme systemintern (nicht dargestellt) und systemübergreifend (vereinfacht dargestellt). Zudem ist es generell möglich eine logische Hierarchie (vgl. Kapitel 2.1.2) für Knoten mittels einer `:-IstTeilVon->` Kante abzubilden. Die Metamodelle der drei zugrunde liegenden Hauptssysteme und die zugehörigen Kantenklassen werden in den folgenden Unterkapiteln detaillierter erläutert.

---

<sup>29</sup> Schreibweise in Anlehnung an Jakumeit *et al.* [2015].

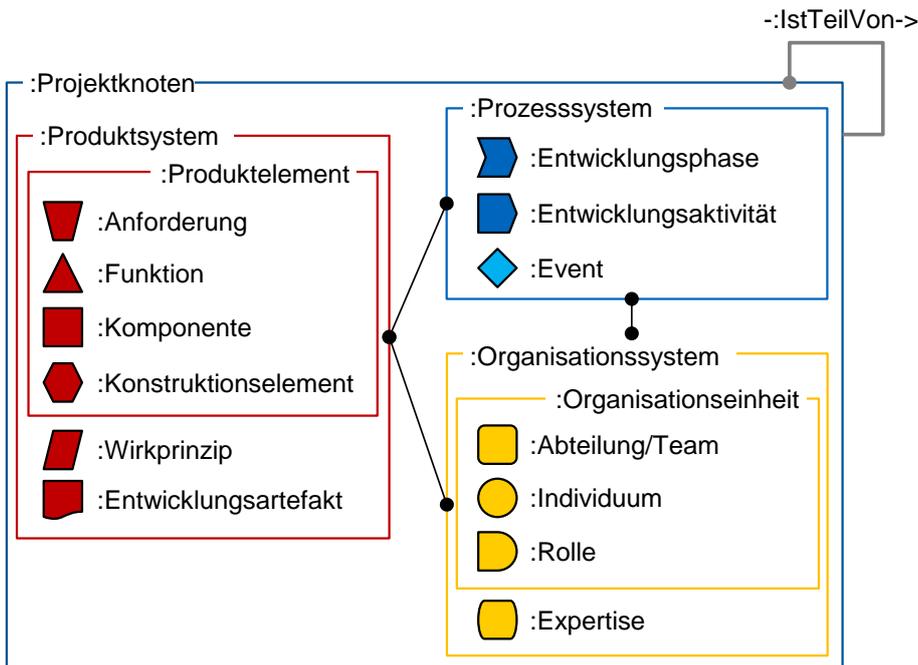
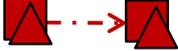


Abbildung 5-1 Schematische Übersicht über die Knotenklassen.

## 5.2.2 Produktsystem

Das Produktsystem wird vorwiegend durch Funktionen (:Funktion) und/oder Komponenten (:Komponente) und deren funktionale und geometrische Abhängigkeiten (vgl. Kapitel 3.1.1) repräsentiert. Mit Komponenten sind hier nicht nur physische Produktumfänge, sondern auch Elektronik- oder Softwarekomponenten gemeint. Falls eine Relation nicht genau zugeordnet werden kann, wird die gerichtete Kante *-:GenerelleSchnittstelle->* verwendet. Eine Komponente kann weiter in einzelne Konstruktionselemente (:Konstruktionselement) dekomponiert werden (logische Hierarchie). Das ermöglicht eine detailliertere Zuordnung geometrischer Bedingungen. Die Zuordnung von Komponenten bzw. Konstruktionselementen zu Funktionen erfolgt über eine *-:Erfüllt->* Kante. Weiterhin kann es vorkommen, dass Wirkprinzipien (:Wirkprinzip) zur Erfüllung von Funktionen unterschieden werden (Wirkprinzip *-:Spezifiziert->* Funktion). Je nachdem wie weit die Lösungsfindung im Entwicklungsprozess voran geschritten ist, werden die Wirkprinzipien in der Datengrundlage nach und nach durch spezifische Komponenten zur Erfüllung der Funktion ersetzt. Im Basis-Metamodell sind auch Anforderungen (:Anforderung) vorgesehen, die mittels einer *-:Erfüllt->* Kante mit Funktionen, Komponenten oder Konstruktionselementen verbunden sein können. Schließlich sind Entwicklungsartefakte (:Entwicklungsartefakt) dem Produktsystem zugeordnet. Entwicklungsartefakte sind Dokumente, Dateien oder Objekte (z. B. Prototypen), die im Laufe der Entwicklung erstellt werden und Produktelemente spezifizieren bzw. repräsentieren. Ein Entwicklungsartefakt stellt dadurch eine direkte Verknüpfung zwischen Produktsystem und Prozesssystem her.

Tabelle 5-1 Kantenklassen innerhalb des Produktsystems.

| Illustration  | Definition                         | Illustration   | Definition                   |
|---|------------------------------------|--|------------------------------|
|  | F/K -:GenerelleSchnittstelle-> F/K |  | F/K -:Signalfluss-> F/K      |
|  | F/K -:Materialfluss-> F/K          |  | F/K -:Energiefluss-> F/K     |
|  | K/KE -:Geometr.Bedingung- K/KE     |  | WP -:Spezifiziert-> F        |
|  | K/KE -:Erfüllt-> F                 |  | EA -:Spezifiziert-> A/F/WP/K |
|  | F/K/KE -:Erfüllt-> A               |  |                              |

A: Anforderung; EA: Entwicklungsartefakt; F: Funktion; K: Komponente; KE: Konstruktionselement;  
WP: Wirkprinzip

### 5.2.3 Prozesssystem

Das Prozesssystem ist maßgeblich durch Entwicklungsaktivitäten (:Entwicklungsaktivität) bestimmt. Es handelt sich dabei um die Prozessschritte, die zur Entwicklung eines Produkts notwendig sind. Generell können diese Prozessschritte weiter dekomponiert werden oder Prozessphasen (:Prozessphase) zugeordnet werden. Beide Knotenklassen sind als identisch anzusehen und können austauschbar verwendet werden. Die Unterscheidung dient lediglich zur Veranschaulichung unterschiedlicher Detaillierungsgrade. Prozesse können mittels einer gerichteten -:Präzedenz-> Kante logisch miteinander verknüpft werden. Zusätzlich zu den Prozessen enthält das Prozesssystem Events (:Event). Mit dieser Knotenklasse können Meilensteine oder Meetings repräsentiert werden. Events können durch Prozesse ausgelöst werden oder auch andersherum andere Prozesse auslösen (:LöstAus-> Kante).

Tabelle 5-2 Kantenklassen innerhalb des Prozesssystems.

| Illustration  | Definition        | Illustration   | Definition      |
|---|-------------------|--|-----------------|
|  | P -:Präzedenz-> P |  | P -:LöstAus-> E |
|   |                   |  | E -:LöstAus-> P |

E: Event; P: Prozess (Entwicklungsaktivität oder Prozessphase)

### 5.2.4 Organisationssystem

Das Organisationssystem ist vorwiegend durch die Abteilungsstruktur geprägt. Nachdem es sich hier häufig nicht um eine rein logische Hierarchie sondern um eine formale Hierarchie handelt, wird diese über die Kantenklasse **-:IstZugeordnet->** abgebildet. Auf detailliertester Ebene werden Individuen (:Individuum) den Abteilungen bzw. Teams (:Abteilung/Team) zugeordnet. Die Berücksichtigung von Rollen (:Rolle) im Organisationssystem ist nicht trivial, weil in einigen Unternehmen die Abteilungsstruktur indirekt über Rollen und deren formale Hierarchie definiert ist. Deshalb sieht das Basis-Metamodell vor, dass Rollen einerseits Abteilungen/Teams und andererseits anderen Rollen untergeordnet werden können. Letztlich können Individuen dann diesen Rollen zugeteilt werden. Insgesamt werden Abteilungen/Teams, Rollen und Individuen verallgemeinert mit dem Begriff Organisationseinheit (:Organisationseinheit) zusammengefasst. Als Teil des Organisationssystems werden auch gegebenenfalls spezifizierte Expertisen (:Expertise) im Basis-Metamodell vorgesehen. Diese Knotenklasse ermöglicht es Individuen oder Rollen unterschiedlichen fachlichen Disziplinen bzw. besonderen Kenntnissen zuzuordnen.

Tabelle 5-3 Kantenklassen innerhalb des Organisationssystems.

| Illustration  | Definition                | Illustration  | Definition               |
|---|---------------------------|---|--------------------------|
|  | AT/I -:IstZugeordnet-> AT |  | R -:IstZugeordnet-> AT/R |
|  | I -:IstZugeordnet-> R     |  | I/R -:IstZugeordnet-> E  |

AT: Abteilung/Team; E: Expertise; I: Individuum; R: Rolle

Generell ist eine vielfache Zuordnung von Organisationseinheiten zueinander erlaubt, um Matrix-Organisationen abbilden zu können.

### 5.2.5 Projektsystem

In diesem Unterkapitel werden die systemübergreifenden Relationen beschrieben. Die zugrunde liegende Logik der Verknüpfung von Produkt-, Prozess- und Organisationssystem kann sich von Unternehmen zu Unternehmen unterscheiden. Insgesamt können drei Kombinationen unterschieden werden (Abbildung 5-2).

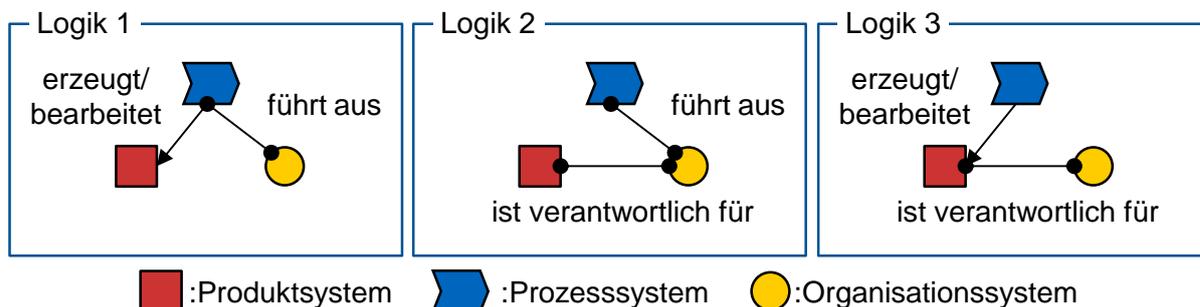


Abbildung 5-2 Drei verschiedene Möglichkeiten, wie Produkt-, Prozess- und Organisationssystem durch native Daten miteinander verknüpft sein können.

Welches Prinzip zu Grunde gelegt wird ist unerheblich, da sich die dritte Relation jeweils aus den anderen beiden Zusammenhängen ableiten lässt. Es kann vorkommen, dass Unternehmen sogar Daten bzw. Projektpläne für alle drei Zusammenhänge erstellen. In diesen Fällen wurde ein Zusammenhang entweder bereits implizit aus den anderen Zusammenhängen abgeleitet, oder die Zusammenhänge wurden redundant erarbeitet. Dann ist eine Überprüfung der Datenkonsistenz notwendig.

Wie bereits in Kapitel 5.2.2 angesprochen stellen die Entwicklungsartefakte eine direkte Verknüpfung von Prozess- und Produktsystem dar. In Prozessen werden Entwicklungsartefakte erzeugt bzw. bearbeitet, die wiederum Input für nachgelagerte Prozesse sind. In nachgelagerten Prozessen werden diese Artefakte entweder weiter bearbeitet oder werden lediglich als Informationsquelle genutzt. In der Praxis wird der Zusammenhang zwischen Prozess- und Produktsystem jedoch häufig zwischen Prozessen und Produktelementen hergestellt, weil die einzelnen Entwicklungsartefakte in den vorhandenen Plänen und Modellen nicht weiter aufgeschlüsselt sind.

Der Zusammenhang zwischen Organisations- und Prozesssystem beschreibt, welche Tätigkeiten von welcher Organisationseinheit ausgeführt werden. In einer RACI-Matrix (vgl. Kapitel 3.1.2) ist häufig zusätzlich festgelegt, wie weitere Organisationseinheiten in einem Prozess involviert sind. Um die tatsächliche Einbindung einer Organisationseinheit in einem Prozess erfassen zu können, werden die RACI-Relationen folgendermaßen interpretiert:<sup>30</sup>

- **Responsible (-:FührtAus-):** Diejenige Organisationseinheit ist ausführungsverantwortlich bzw. führt den Prozess tatsächlich aus.
- **Accountable (-:EntscheidetIn-):** Diejenige Organisationseinheit ist für das Ergebnis eines Prozesses rechenschaftspflichtig. Sie trifft notwendige Entscheidungen und genehmigt bzw. billigt Teilergebnisse. In der Regel handelt es sich hierbei um die hierarchisch übergeordnete Organisationseinheit der ausführenden Organisationseinheit.

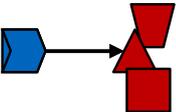
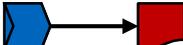
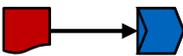
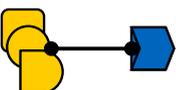
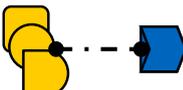
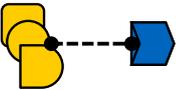
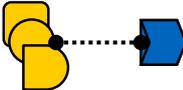
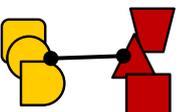
<sup>30</sup> Diese Interpretation lehnt sich an die Auslegung an, die von Global Project Design, LLC verwendet wird. <http://gpdesign.com/>, zuletzt aufgerufen am 28.09.2016

- **Consulted (-:UnterstütztIn-):** Diejenige Organisationseinheit stellt bei Bedarf Kapazität bzw. Knowhow zur Durchführung des Prozesses zur Verfügung.
- **Informed (-:WirdInformiertÜber-):** Diejenige Organisationseinheit wird über Arbeitsergebnisse und Entscheidungen informiert.

Diese Aufteilung spielt dann eine Rolle, wenn es um die Ableitung von Abstimmungsbedarfen geht. Der Abstimmungsbedarf besteht zwischen zwei verantwortlichen Organisationseinheiten und gilt als bereits adressiert, sobald eine der Organisationseinheiten bereits in den Prozess der anderen involviert ist (d. h. es besteht kein Koordinationsbedarf mehr).

Die Relation zwischen Organisations- und Produktsystem wird lediglich über eine **-:IstVerantwortlich-** Kante repräsentiert, weil in der Regel keine detaillierteren Zusammenhänge gegeben sind, wenn das Organisationssystem direkt dem Produktsystem zugeordnet ist. In einem solchen Fall könnte aber beispielsweise der bzw. die Vorgesetzte einer bzw. einem Verantwortlichen als rechenschaftspflichtige Person interpretiert werden.

Tabelle 5-4 Systemübergreifende Kantenklassen.

| Illustration  | Definition                    | Illustration  | Definition                  |
|---|-------------------------------|---|-----------------------------|
| Prozess-Produkt   |                               |   |                             |
|  | P -:Erzeugt/Bearbeitet-> PE   |  | P -:Erzeugt/Bearbeitet-> EA |
|   |                               |  | EA -:IstInputFür-> P        |
| Organisation-Prozess  |                               |   |                             |
|  | OE -:FührtAus- P              |  | OE -:WirdInformiertÜber- P  |
|  | OE -:UnterstütztIn- P         |  | OE -:EntscheidetIn- P       |
| Organisation-Produkt  |                               |   |                             |
|  | OE -:IstVerantwortlichFür- PE |   |                             |

EA: Entwicklungsartefakt; OE: Organisationseinheit (Abteilung/Team, Individuum, Rolle); P: Prozess (Entwicklungsaktivität oder Prozessphase); PE: Produktelement; R: Rolle

### 5.2.6 Vorhandene Datenquellen

Die Daten zur Erstellung eines Projektgraphen können aus unterschiedlichen Quellen erhoben werden. Die Auflistung möglicher Datenquellen zur Modellierung von Produktportfolios nach

Kissel [2014, S. 97] dient hierfür als Ausgangsbasis und wird auf Basis der Recherchen zu vorhandenen Modellen (Kapitel 3.1) ergänzt (Tabelle 5-5).

*Tabelle 5-5 Mögliche Datenquellen zur Modellierung des Projektsystems in Anlehnung an Kissel [2014, S. 97]; Ergänzungen des Autors sind mit \* markiert.*

|   |  |
|---|--|
| <b>Erzeugersysteme bzw. Systeme zur rechnerunterstützten Entwicklung (CAx)*</b> | Computer-aided Design (CAD)  |
|   | Computer-aided Engineering (CAE)   |
|   | Software zur Elektroplanung (Schaltplankonfiguration, etc.)                  |
|   | Computer-aided Software Engineering Systeme (CASE)                           |
| <b>Verwaltungssysteme und sonstige Datenbank-gestützte Systeme</b>              | Produktdatenmanagement Systeme (PDM) bzw. Engineering Data Management (EDM)* |
|   | Product-Lifecycle Management Systeme (PLM)                                   |
|   | Enterprise-Resource-Planning Systeme (ERP)                                   |
|   | Team Data Management Systeme (TDM)*  |
|   | Prozessmanagement Systeme*   |
|   | Projektmanagement Systeme*   |
|   | Anforderungsmanagement-Systeme   |
|   | Individuelle datenbankgestützte Systeme                                      |
| <b>Unternehmens- oder Projektdokumentationen</b>                                | Projekt-Wikis, Intranet*, Wissensdatenbanken                                 |
|   | Ausgefüllte Methodenformblätter, wie z. B. QFD, FMEA oder Einflussmatrizen   |
|   | Projektpläne vergangener Projekte (z. B. Zeitpläne, RACI-Diagramme, etc)     |
|   | Berichte und Präsentationen  |
| <b>Individuelle Abfragen</b>  | Interviews   |
|   | Workshops  |

Je nachdem, welche Systeme in einem Unternehmen eingesetzt werden und welche Daten dadurch zur Verfügung stehen, kann das Basis-Metamodell angepasst werden. Voraussetzung für die Integration von Daten unterschiedlicher Systeme in einem gemeinsamen Datengraphen ist eine grundlegende Konsistenz der Daten. Das heißt, dass identische Elemente aus verschiedenen Systemen zum Beispiel anhand eines eindeutigen Namens als solche erkannt werden können.

Für die Analyse eines Projektsystems in Hinblick auf Abstimmungsbedarfe aufgrund technisch-logischer Abhängigkeiten bilden Daten über geplante Produktelemente und deren Zusammenhänge die Ausgangsbasis. Zusätzlich müssen wenigstens Daten über die Verknüpfung der Produktelemente entweder mit Prozessen oder mit Organisationseinheiten vorhanden sein. Fehlende Daten können gegebenenfalls durch Interviews, Workshops oder Dokumentenanalysen erhoben und manuell modelliert werden.

### 5.3 Vorgehen zur strukturbasierten Koordinationsplanung

Der Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung richtet sich primär an Projektmanagerinnen bzw. Projektmanager oder leitende Systemingenieurinnen bzw. -ingenieure, die sich zum Zeitpunkt der Konzeptdefinition einen Überblick über zukünftige Abstimmungsbedarfe im Laufe der Detailentwicklung verschaffen möchten. Das Grundprinzip des Ansatzes basiert auf folgender Logik: Eine technische Abhängigkeit zwischen zwei Produktelementen führt zu Abstimmungsbedarf und äußert sich auf zwei Ebenen (Abbildung 5-3):

- **Prozessebene:** Zwischen den Prozessschritten, die die Produktelemente bearbeiten bzw. erzeugen, oder die von den jeweiligen Organisationseinheiten durchgeführt werden.
- **Organisationsebene:** Zwischen den Organisationseinheiten, die für die Produktelemente verantwortlich sind, oder die die jeweiligen Prozessschritte durchführen.

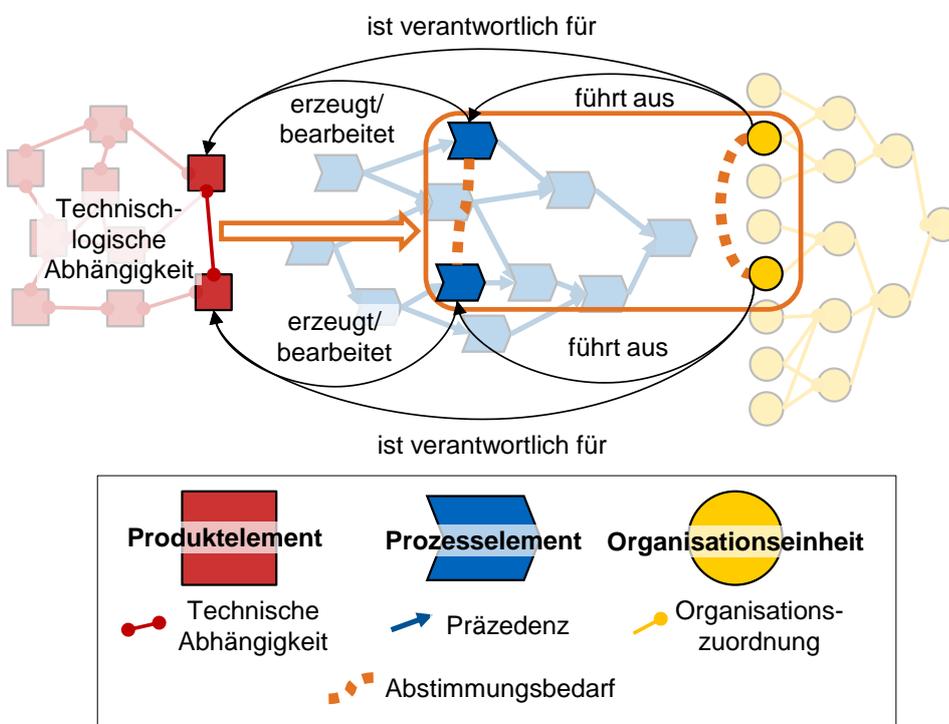


Abbildung 5-3 Überblick über die Logik des Ansatzes zur strukturbasierten Koordinationsplanung: Eine technische Abhängigkeit auf Produktebene führt zu Abstimmungsbedarf auf Prozess- und Organisationsebene.

Das Vorgehen für den Gesamtansatz gliedert sich in vier Schritte:

1. **Vorbereitung:** Im ersten Schritt werden vorhandene Daten (bzw. implizites Wissen) in abstrakte Strukturmodelle (Graphen, bestehend aus Knoten und Kanten) überführt. Je nach Grad der Digitalisierung dieser Basisinformationen kann der Schritt automatisiert ablaufen. Fehlende relevante Daten werden manuell modelliert.
2. **Integration:** Im zweiten Schritt werden die Elemente aus dem Produkt-, Prozess- und Organisationssystem miteinander verknüpft. Sofern gewisse Zusammenhänge allgemein gültig sind, lässt sich auch diese Verknüpfung automatisieren. Andernfalls ist eine manu-

elle Verknüpfung notwendig. Bei der Entwicklung mechatronischer Produkte kann es hier zusätzlich notwendig sein, das zu entwickelnde Produkt zunächst systematisch zu partitionieren (vgl. Chucholowski *et al.* [2016a]). Erst die Verknüpfung der unterschiedenen Domänen mit den in der Organisation repräsentierten Disziplinen (z. B. Fachbereiche) und disziplinspezifischen Prozessen ermöglicht die Ausleitung der Zusammenhänge zwischen den Projekt-Teilsystemen. Hinzu kommt, dass die in den Prozessmodellen generisch beschriebenen Prozessschritte für das betrachtete Entwicklungsprojekt instanziiert werden müssen. Zum Beispiel wird der Referenzprozess zur Entwicklung einer mechanischen Komponente für unterschiedliche Komponenten jeweils einzeln (parallel oder sequentiell) durchlaufen. Die Teilschritte müssen dann entsprechend voneinander unterschieden werden können. Je nachdem, wie einfach sich die Regeln zur Verknüpfung der Systemelemente und Instanzierung der Prozesse formal beschreiben lassen, kann auch dieser Schritt automatisiert ablaufen.

3. **Analyse:** Der dritte Schritt findet automatisiert statt. Mittels vordefinierter Algorithmen können anhand der modellierten Projektstruktur *Abstimmungsbedarfe* rechnergestützt abgeleitet werden und mittels unterschiedlicher vordefinierter Indikatoren (errechnet aus strukturellen Merkmalen) bewertet werden. Die Bewertung zielt darauf ab, die Relevanz der ermittelten Abstimmungsbedarfe für die Koordinationsplanung beurteilen zu können und daraus resultierende *Koordinationsbedarfe* zu identifizieren. Mit geeigneter Software-Unterstützung (prototypisch für diese Arbeit) werden die Ergebnisse übersichtlich dargestellt.
4. **Interpretation:** Die Interpretation der Ergebnisse obliegt der Anwenderin bzw. dem Anwender. Die bereitgestellte Information und übersichtliche Visualisierung der Zusammenhänge unterstützt jedoch dabei, besonders relevante Abstimmungsbedarfe gezielt zu adressieren und geeignete Koordinationsmaßnahmen zu bestimmen.

Die vier Schritte werden in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert und anhand eines anschaulichen Beispiels illustriert. Das Beispiel baut auf einem vorhandenen Demonstrationsbeispiel<sup>31</sup> zur Analyse von Produktzusammenhängen in einem LEGO® Bagger<sup>32</sup> auf und erweitert dies um ein fiktives Prozess- und Organisationssystem.

### 5.3.1 Schritt 1: Vorbereitung

Bevor vorhandene Daten in ein Strukturmodell überführt werden können, muss zunächst das Metamodell (d. h. die „Sprache“, in der die Daten im Strukturmodell repräsentiert werden; vgl. Kapitel 2.4.2), für den spezifischen Anwendungsfall definiert werden. In Kapitel 5.2 wurde eine Grundstruktur für ein Metamodell zur Repräsentation des Projektsystems vorgeschlagen. Die davon ausgehende Definition eines anwendungsspezifischen Metamodells richtet sich danach, welche Daten im Betrachtungsfall vorhanden sind. Für jede der in Abbildung

---

<sup>31</sup> <https://www.soley.io/de/blog/bauma-faszination-baumaschinen/>, zuletzt aufgerufen am 03.11.2016

<sup>32</sup> Ausschlussklärung: LEGO® ist eine Marke der LEGO Gruppe, durch die die vorliegende Arbeit weder gesponsert noch autorisiert oder unterstützt wird.

5-1 angegebenen Element- und Relationstypen muss geprüft werden, ob die vorhandenen Daten und Informationen auf dem jeweiligen Detaillierungsgrad (z. B. Unterscheidung von Funktion und Komponente) abgebildet werden können. Letztendlich steigt mit zunehmendem Detaillierungsgrad der Modellierung die potentielle Aussagekraft der Analyseergebnisse. Gleichzeitig steigt aber auch das Risiko, Aussagen durch eine inkonsistente oder unvollständige Datengrundlage zu verfälschen. Diesbezüglich hat sich für die Modellierung von Projektsystemen in der Praxis das Motto „*Better true than detailed*“<sup>33</sup> bewährt.

Die Definition des Metamodells im Rahmen der Vorbereitung ist ein einmaliger Vorgang. Sobald das Metamodell für einen Anwendungsfall definiert wurde, kann es in Zukunft für ähnliche Anwendungsfälle wiederverwendet werden. Es muss lediglich angepasst werden, wenn sich die Struktur der zugrunde liegenden Daten und somit die notwendigen Element- und Relationstypen verändern (z. B. durch eine Umstellung des IT-Systems). Die Eignung des Metamodells sollte jedoch trotzdem für jeden Anwendungsfall kritisch geprüft werden.

Aus dem Metamodell ergibt sich die Abbildungsvorschrift für den Import der Daten in einen Graphen (Abbildung 5-4). Vorhandene, formal repräsentierte Daten können also über Regeln, die an das Metamodell angepasst wurden, rechnergestützt in Strukturmodelle überführt werden bzw. in Graphen importiert werden. Dadurch ergibt sich für die Vorbereitung großes Automatisierungspotential. Sobald sich die Quelldaten verändern, muss die Überführung erneut stattfinden. Sind relevante Elemente und Relationen in Dokumenten wie z. B. Präsentationsfolien oder Textdateien nicht formal gespeichert oder sogar nur als implizites Wissen vorhanden, müssen diese manuell in den Datengraphen eingepflegt werden.

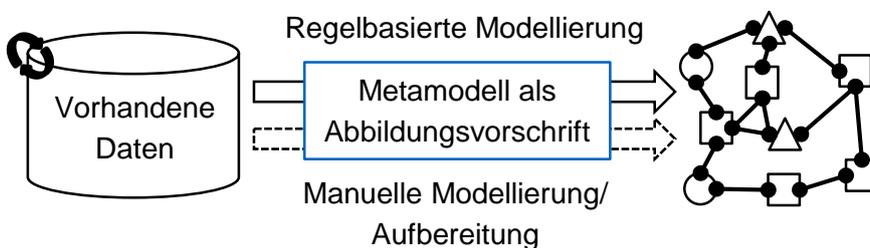


Abbildung 5-4 Überführung vorhandener Daten über ein definiertes Metamodell in einen Datengraphen.

Bei der Modellierung vorhandener Daten können Redundanzen und Inkonsistenzen auftreten, wenn unterschiedliche Datenquellen verwendet werden oder wenn manuell fehlerhaft modelliert wird (z. B. identische Datenpunkte werden doppelt mit unterschiedlichen Bezeichnungen modelliert). Auch hierfür besteht die Möglichkeit Regeln zur Datenkonsolidierung zu verwenden. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet und beispielhaft auf die Ausführungen zur Datenkonsolidierung nach Kissel [2014, S. 104] verwiesen. Im Folgenden wird angenommen, dass die zugrundeliegenden Daten und Informationen (innerhalb der betrachteten Systemgrenzen) vollständig und konsistent sind. Für die drei Projektsysteme werden nachfolgend mögliche Datengrundlagen beschrieben.

<sup>33</sup> Bryan Moser, Interviewpartner (vgl. Anhang 9.2). Siehe dazu auch Moser *et al.* [2008]

## Produktsystem

Zur Modellierung des Produktsystems sollten auf abstrakter Ebene in jedem Fall die geplanten Produktelemente und Relationen zwischen diesen Elementen angegeben werden können (siehe generisches Metamodell in Abbildung 5-1). Die geläufigste Datengrundlage dafür könnte eine klassische Stückliste bzw. Baustruktur sein. Die Zusammenhänge spiegeln dann lediglich die Baugruppenzugehörigkeit wider, wodurch jedoch auf indirekte Abhängigkeiten geschlossen werden kann. Eine solche Stückliste oder Baustruktur könnte aus Vorgängerprodukten übernommen werden und stellt im Falle von Weiterentwicklungen eine hilfreiche Repräsentation des zu entwickelnden Produkts dar.

Nach dem Entwicklungsvorgehen nach Pahl/Beitz [Feldhusen & Grote 2013] oder nach den Empfehlungen der VDI 2221 [VDI 1993] bzw. VDI 2206 [VDI 2004] werden im Rahmen der Konzeptentwicklung Anforderungen, Funktionen und funktionale Zusammenhänge (kybernetische Flüsse) bestimmt. Je nachdem, welche Umfänge aus Vorgängerentwicklungen übernommen werden können oder wie detailliert die Konzeptdefinition ausfällt, sind bereits auch Funktionsträger (Komponenten) und deren geometrischen Zusammenhänge definiert. Im Model-based Systems Engineering (MBSE) wird vorgeschlagen insbesondere Anforderungen, Funktionen, Komponenten und deren Relationen durchgängig in formalen Modellen (z. B. SysML, vgl. Kapitel 3.1.1) abzubilden [Walden *et al.* 2015]. Dadurch stellen diese Daten eine ideale Ausgangsbasis zur Strukturmodellierung des Produktsystems dar.

Eine weitere Datengrundlage können bereits erstellte CAD-Modelle, Schaltpläne oder die Softwarearchitektur (Programmstruktur) bieten. Aus einem Zusammenbau-Modell in CAD lassen sich über den Strukturbaum nicht nur die Bauteile einer Baugruppe auslesen, sondern auch die Konstruktionselemente<sup>34</sup> der Bauteile und diverse Bedingungen zwischen den Bauteilen (z. B. Flächenkontakt, Konzentrität, Parallelität, etc.). Schaltpläne geben Aufschluss über geplante Sensoren, Aktoren und den Stoff-, Energie- und Signalflüssen zwischen diesen. In der Softwarearchitektur wird festgelegt, welche Programmelemente bzw. Algorithmen geplant sind und wie diese zusammenspielen (z. B. Übergabe von Parametern, etc.).

### Illustratives Beispiel

Im Fall des LEGO Baggers stehen im Demonstrationsbeispiel von Soley bereits Daten über die Produktarchitektur mit einer Funktionshierarchie (21 Funktionen) und einer Bauteilhierarchie (132 Komponenten) zur Verfügung (Abbildung 5-5). In dem Modell sind insgesamt 12 Funktionen mit 26 Komponenten (Baugruppen) verknüpft (Abbildung 5-6). Die einzelnen Bauteile, aus denen sich die Baugruppen zusammensetzen, werden teilweise in mehreren Baugruppen verwendet (Kommunalitätsprinzip). Die Produktdaten des Soley-Beispiels werden zur Veranschaulichung um kybernetische Flüsse auf Funktionsebene und geometrische Bedingungen auf Komponentenebene ergänzt. Detaillierte Schaubilder für weitere Details sind im Anhang 9.3 einsehbar.

---

<sup>34</sup> Ein Konstruktionselement in CAD bezeichnet eine Positiv- oder Negativgeometrie, die zu einem Grundkörper hinzugefügt wurde. Beispiele für Konstruktionselemente, die in CAD-Programmen in der Regel vordefiniert sind, sind: Bohrungen (mit oder ohne Gewinde); Nuten; Phasen; Taschen; Rillen; Oberflächenbearbeitung; etc.

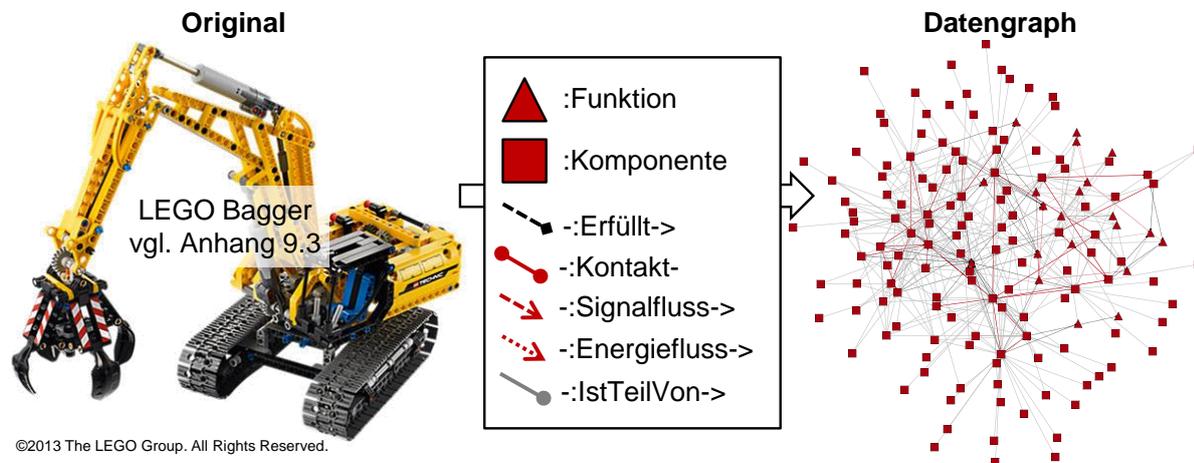


Abbildung 5-5 Erzeugung des Datengraphen für das Produktsystem im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

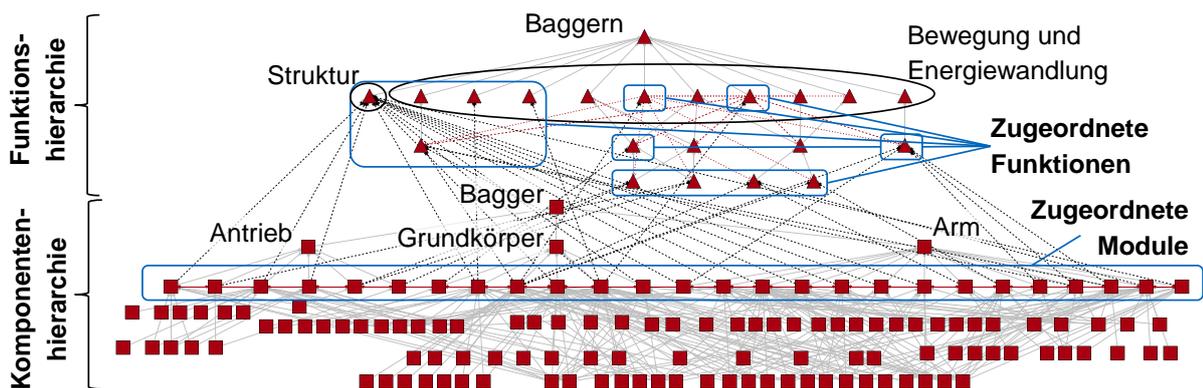


Abbildung 5-6 Veranschaulichung der Produktarchitektur im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

## Prozesssystem

Das Prozesssystem bildet die zur Entwicklung notwendigen Tätigkeiten und die logischen Zusammenhänge zwischen diesen Aktivitäten ab. Unternehmen haben sich dafür häufig ihren eigenen Entwicklungsprozess als Referenzprozess definiert, der aus unterschiedlichen Phasen und mehreren Teilschritten besteht. Die Modellierungsform der Prozesse ist dabei in der Regel sehr unterschiedlich und stark vom dafür eingesetzten Software-Tool abhängig. Trotzdem zielt ein Großteil der Prozessmodellierungen darauf ab, die Prozessschritte und deren Zusammenhänge formal abzubilden. Sie können deshalb als Datengrundlage zur Abbildung der Prozessstruktur genutzt werden. Falls keine formalen Prozessmodelle als Datengrundlage zur Verfügung stehen, können Projektpläne von vergangenen Projekten (z. B. Projektstrukturpläne) als Ausgangsbasis dienen.

Viele Prozessmodellierungssprachen sehen nicht nur die reine Modellierung der Aktivitäten vor, sondern beinhalten auch z. B. die Modellierung von Arbeitsergebnissen, die von einer Aktivität erzeugt werden, oder die Modellierung von Personen/Rollen, die einen Prozessschritt bearbeiten bzw. dafür verantwortlich sind (vgl. Kapitel 3.1.3). Hierbei handelt es sich um Daten, die zur Verknüpfung des Prozesssystems mit dem Produktsystem bzw. dem Organisationssystem verwendet werden können (siehe Kapitel 5.3.2).

Bei der Modellierung des Prozesssystems sollten nicht nur unternehmensinterne Entwicklungstätigkeiten berücksichtigt werden, sondern auch Prozessschritte mit einbezogen werden, die z. B. von Zulieferern oder Entwicklungspartnern durchgeführt werden. So kann auch die Zusammenarbeit mit externen Partnern in der Koordinationsplanung berücksichtigt werden.

### Illustratives Beispiel

Für das illustrative Beispiel wird angenommen, dass ein Referenzprozess für die Entwicklung vorhanden ist. Darin sind unterschiedliche Schritte für die verschiedenen Domänen und grundlegende logische Zusammenhänge zwischen diesen Schritten vorgesehen. Außerdem gibt es einen Projektplan. Die darin enthaltenen Prozessschritte sind auf Basis des Referenzprozesses für die unterschiedlichen Produktumfänge instanziiert. Die Entwicklungsaktivitäten im Projektplan können samt ihrer darin spezifizierten logischen Zusammenhänge in einen Graphen überführt werden (Abbildung 5-7). Weitere Details zum verwendeten Referenzprozess und Projektplan sind in Anhang 9.3 dargestellt.

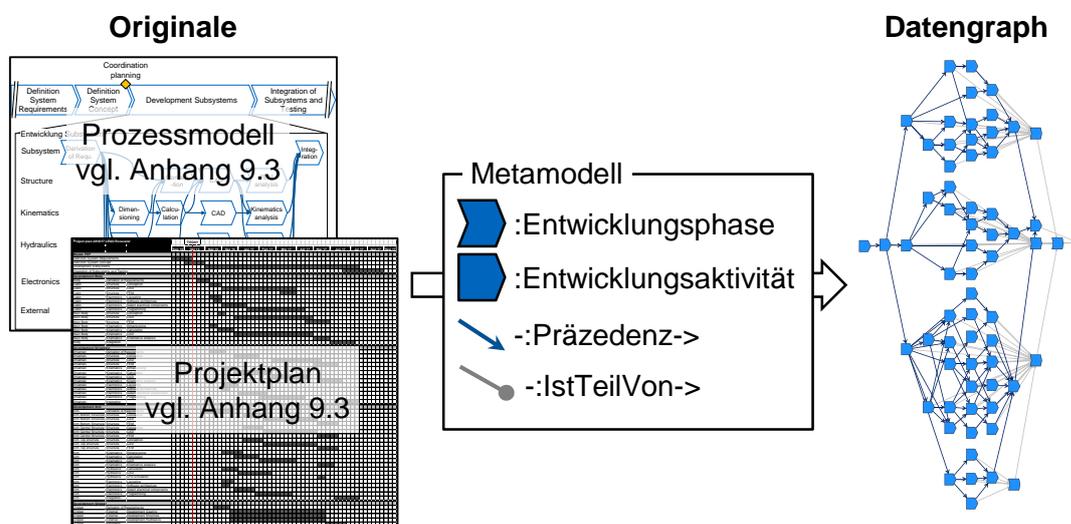


Abbildung 5-7 Erzeugung des Datengraphen für das Prozesssystem im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

### Organisationssystem

Zur Modellierung des Organisationssystems können Organigramme genutzt werden, in denen die Abteilungs- und Teamstruktur bis auf einzelne Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Individuen) abgebildet ist. In der Regel werden daraus hierarchische Strukturen ersichtlich, die jedoch nicht zwangsläufig eindimensional sein müssen. In organisationalen Mischformen wie z. B. Matrixorganisationen oder schwachen Projektorganisationen können Individuen mehre-

ren organisationalen Einheiten zu- bzw. untergeordnet sein. Weitere Daten über organisationale Zugehörigkeiten können ergänzend aus Rollenbeschreibungen entnommen werden.

Analog zum Prozesssystem, ist es beim Organisationssystem wichtig das gesamte Projektsystem zu betrachten. Falls Zulieferer oder Entwicklungspartner am Projekt beteiligt sind, sollte auch deren organisationale Einbindung in das Projekt modelliert werden.

### Illustratives Beispiel

Die Aufbauorganisation zur Entwicklung des LEGO Baggers ist in einem Organigramm gespeichert. Ein formal modelliertes Organigramm, das zum Beispiel in Microsoft Visio erstellt wurde, ermöglicht auch hier einen automatisierten Datenimport der unterschiedlichen Abteilungen, Personen, Rollen, Expertisen und deren Zuordnungen (Abbildung 5-8). Für das illustrative Beispiel sei ein externes Partnerunternehmen an der Entwicklung beteiligt, das den Greifer des Baggers entwickelt. Details zur Organisation stehen in Anhang 9.3 zur Verfügung.

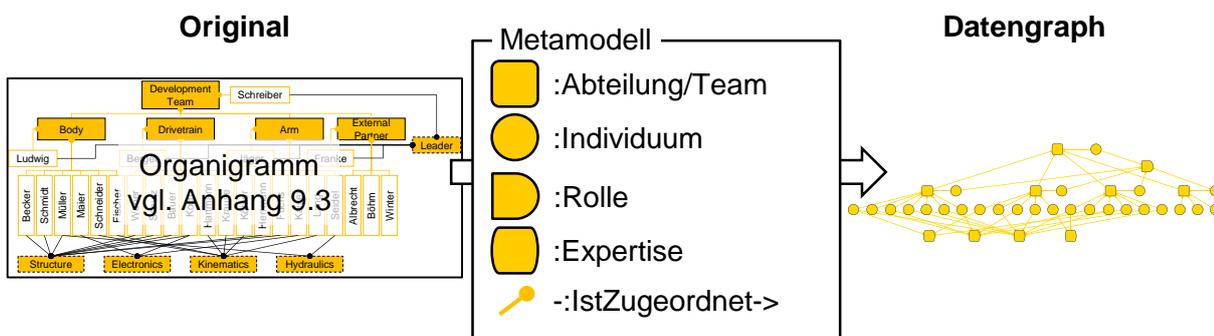


Abbildung 5-8 Erzeugung des Datengraphen für das Organisationssystem im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

### 5.3.2 Schritt 2: Integration

Die Vorbereitung zielt zunächst darauf ab, vorhandene Daten und Informationen in Strukturmodelle zu überführen. Die einzelnen Strukturmodelle für Produkt-, Prozess- und Organisationssystem müssen im nächsten Schritt integriert bzw. verknüpft werden. Je nach Datenlage können Verknüpfungen bereits aus vorhandenen Daten abgeleitet werden. Der Schritt wird jedoch getrennt betrachtet, weil die Integration jeweils projektspezifisch erfolgen sollte. Nachdem die Daten zum Prozesssystem (Referenzprozesse) und Organisationssystem (Aufbauorganisation des Unternehmens), die im Rahmen der Vorbereitung modelliert werden, zunächst projektspezifisch sind, können sie für mehrere Projekte wiederverwendet werden. Auch die Regeln zum Import der Daten bezüglich der Produktstruktur des zu entwickelnden Produkts in einen Graphen bleiben von Projekt zu Projekt gültig und können wieder verwendet werden. Im Schritt der Integration werden dagegen insbesondere projektspezifische Zusammenhänge zwischen den Projektsystemen berücksichtigt. Dafür ist es zunächst wichtig zu verstehen, dass die bis dahin modellierte Prozessstruktur von generischem Charakter ist und die enthaltenen Prozessschritte erst für das Projekt instanziiert werden müssen. So ist zum

Beispiel der Referenzprozess zur Entwicklung einer mechanischen Baugruppe in mehreren Teilschritten definiert und etwaige Zusammenhänge mit anderen Entwicklungstätigkeiten im Gesamtentwicklungsprozess sind modelliert. Dieser Referenzprozess wird innerhalb des Projekts jedoch für mehrere Baugruppen mehrmals durchlaufen, d. h. instanziiert. Auch die konkrete Zuordnung „Wer macht was?“ wird oft erst projektspezifisch entschieden.

Trotz projektspezifischer Zuordnungen und Instanziierung von Prozessen folgt diese Integration der Strukturmodelle der Teilprojektsysteme häufig bestimmten Mustern, die als Regeln formuliert werden können und so den Vorgang der Integration automatisierbar machen. Beispielsweise folgt die oben genannte Instanziierung eines Referenzprozesses zur Entwicklung einer mechanischen Baugruppe dem Muster, dass der Referenzprozess für jede Baugruppe einmal instanziiert wird.

Ansonsten kommen im Schritt der Integration weitere Daten zum Einsatz, die im Rahmen des Projektmanagements definiert werden. Beispielfhaft sind hier Netzpläne, Gantt-Diagramme, Kapazitätspläne oder RACI-Diagramme zu nennen.

### Illustratives Beispiel

Für das illustrative Beispiel wird eine *Responsibility Assignment Matrix* vorbereitet, in der definiert wird, welche Person an der Ausführung welcher Entwicklungsaktivität beteiligt ist. Ebenfalls wird in einer Matrix spezifiziert, welche Entwicklungsaktivität welches Produktelement erzeugt bzw. bearbeitet. Beide Matrizen generieren automatisch die Kanten vom Typ *-:FührtAus-* zwischen Organisations- und Prozesssystem sowie die Kanten vom Typ *-:ErzeugtBearbeitet->* zwischen Prozess- und Produktsystem in einem integrierten Datengraphen (Abbildung 5-9).

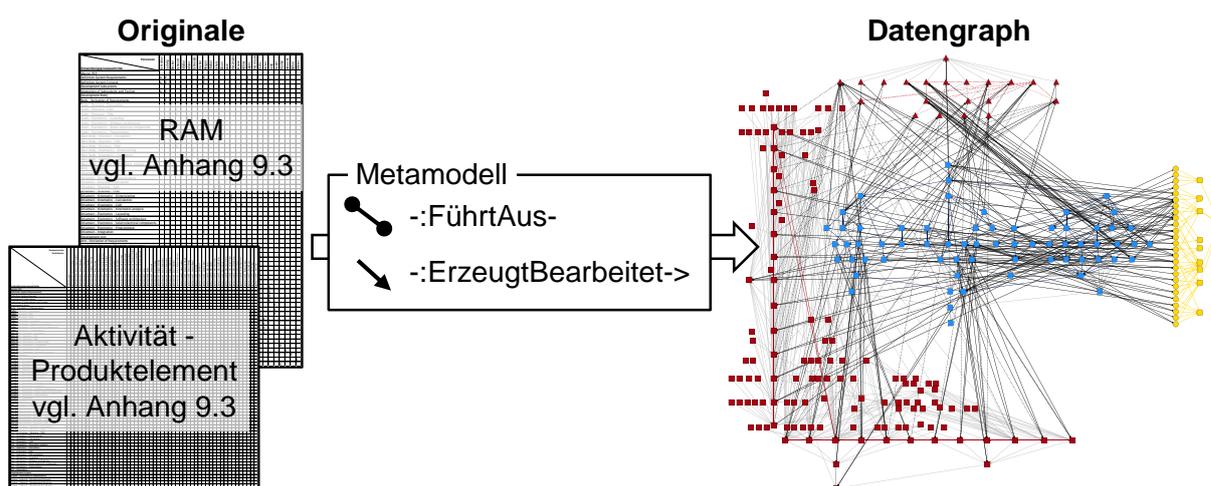


Abbildung 5-9 Erzeugung eines integrierten Datengraphen im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

### 5.3.3 Schritt 3: Analyse

Nachdem in den beiden voran gegangenen Schritten die aktuelle IST-Situation des Projekts aus Produkt-, Prozess- und Organisationsperspektive in Strukturmodellen erfasst wurde, kön-

nen die Zusammenhänge analysiert und daraus Koordinationsbedarfe abgeleitet werden. Die Analyse findet komplett rechnerbasiert statt und verfolgt wie in Abbildung 5-3 dargestellt das übergeordnete Grundprinzip: Eine technisch-logische Abhängigkeit auf Produktebene führt zu Abstimmungsbedarf auf Prozess- und Organisationsebene. Strukturelle Merkmale liefern daraufhin Hinweise auf Koordinationsbedarfe. Insgesamt besteht die Analyse aus vier Bausteinen:

1. Erfassung der technisch-logischen Abhängigkeiten im Produktsystem
2. Ableitung von Abstimmungsbedarfen im Prozess- und Organisationssystem
3. Berechnung struktureller Merkmale
4. Visualisierung der Ergebnisse

Im Rahmen der Analyse wird zwischen den nativen Ursprungsdaten, die während der Vorbereitung und Integration erhoben wurden, und daraus abgeleiteten Analysedaten unterschieden. Dies wird ermöglicht, indem separate analytische Knoten- und Kantenklassen im Metamodell definiert werden. Die Differenzierung erzeugt Vorteile sowohl für die Flexibilität als auch für die Standardisierung von Analysesequenzen. Die einzelnen Analyse-Bausteine werden im Folgenden erläutert.

### Erfassung technisch-logischer Abhängigkeiten

Zur Ableitung möglicher Abstimmungsbedarfe muss zunächst jede denkbare technisch-logische Abhängigkeit erfasst werden. Dabei sollen nicht nur direkte Relationen zwischen Elementen des Produktsystems, sondern auch indirekte Abhängigkeiten berücksichtigt werden. In Anlehnung an die in Tabelle 4-1 identifizierten Abhängigkeitsarten werden folgende technisch-logische Abhängigkeiten im Produktsystem betrachtet:

- **Direkte Abhängigkeiten:** Zunächst spielen *direkte Produktabhängigkeiten* zwischen Komponenten, Funktionen, Wirkprinzipien, Entwicklungsartefakten und Anforderungen eine entscheidende Rolle. Neben kybernetischen Flüssen und geometrischen Bedingungen werden hier die Kantentypen *-Erfüllt->* und *-Spezifiziert->* berücksichtigt (z. B. Funktion erfüllt Anforderung oder Entwicklungsartefakt spezifiziert Komponente). Darüber hinaus wird die direkte Mutter-Kind Beziehung zwischen Produktelementen *unterschiedlicher Dekompositionsebenen* als technisch-logische Abhängigkeit interpretiert. Dadurch wird sichergestellt, dass auch Abstimmungsbedarfe zwischen Prozessen und Organisationseinheiten berücksichtigt werden, die das zu entwickelnde Produkt auf unterschiedlichen Ebenen adressieren (z. B. Grobkonstruktion einer Baugruppe und Detailkonstruktion eines darin enthaltenen Bauteils).
- **Indirekte Abhängigkeiten:** Relevante Abhängigkeiten für Abstimmungsbedarf ergeben sich auch indirekt, wenn zwischen zwei Produktelemente eine *Gemeinsamkeit* besteht, weil sie ein drittes Produktelement gemeinsam erfüllen oder spezifizieren. So besteht zum Beispiel potentieller Abstimmungsbedarf in Bezug auf zwei Komponenten, die die gleiche Funktion erfüllen. Eine weitere indirekte Abhängigkeit wird zwischen zwei Produktelementen mit *gemeinsamer Mutter* gesehen, das heißt Teil eines gemeinsamen übergeordneten Produktelements sind. Dieser indirekten Abhängigkeit liegt die Annahme zugrunde,

dass diese zwei Produktelemente mit hoher Wahrscheinlichkeit voneinander abhängig sind. Dadurch werden Informationen aus der Produktstruktur genutzt, die vor allem dann wertvoll sind, wenn keine oder unvollständige Daten über direkte Produktabhängigkeiten verfügbar sind. Zuletzt sollen indirekte Abhängigkeiten berücksichtigt werden, die auf (geplanter) *Kommunalität* basieren. Zum Beispiel ist Abstimmung zwischen zwei Baugruppen notwendig, die gemeinsame Gleich- oder Wiederholteile besitzen.

Um sowohl direkte als auch indirekte technische Abhängigkeiten bei der Ableitung von Abstimmungsbedarfen zu berücksichtigen, wird mittels Graphentransformation für jede dieser Abhängigkeiten eine Kante vom Typ *-AnalytischeProduktRelation-* erzeugt. Abbildung 5-10 zeigt die entsprechenden Muster, die dafür in Transformationsregeln definiert sind. In einem Attribut wird gespeichert, um welche Art von technisch-logischer Abhängigkeit es sich handelt. Die Kante ist ungerichtet definiert, da zur Identifikation von Abstimmungsbedarfen die Richtung einer Abhängigkeit (z. B. bei kybernetischen Flüssen) unerheblich ist. Es sei darauf hingewiesen, dass eine analytische Produktrelation nicht zwangsläufig einer realen Abhängigkeit entspricht, sondern lediglich eine potentielle Abhängigkeit repräsentiert.

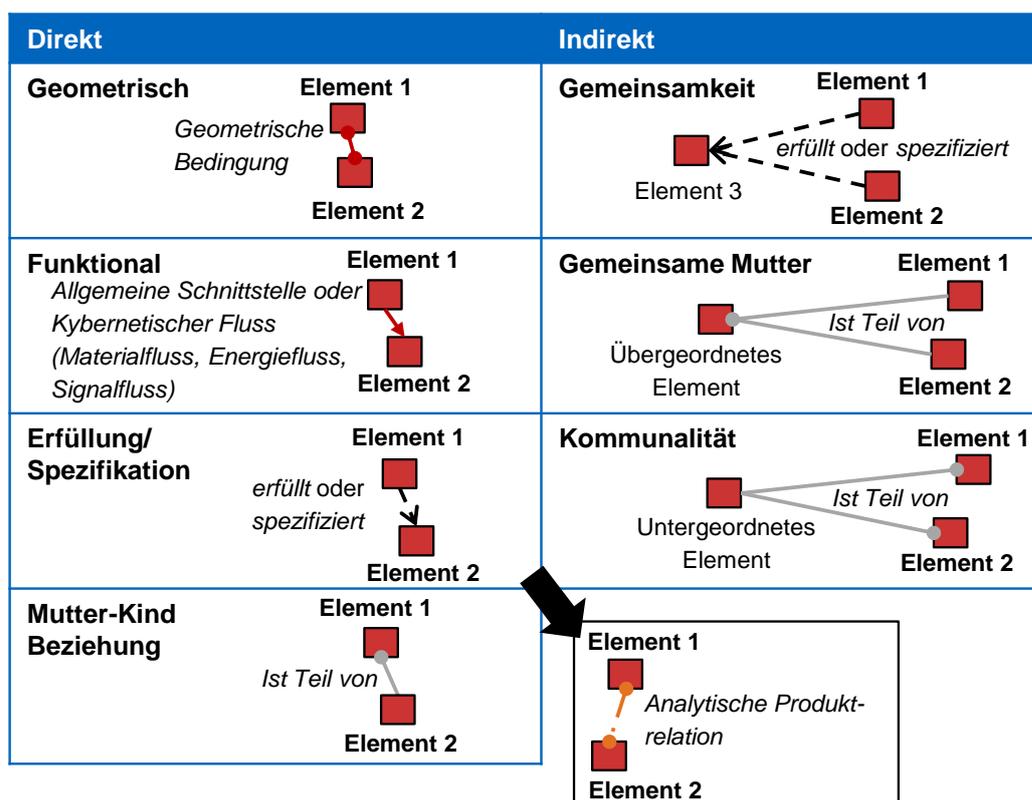


Abbildung 5-10 Allgemeine Muster für die Graphentransformationsregeln zur Ableitung analytischer Produktrelationen auf Basis direkter und indirekter Zusammenhänge im Produktsystem.

Je nach vorhandener Datenbasis kann es notwendig sein, weitere indirekte Zusammenhänge auf Basis bereits abgeleiteter analytischer Produktrelationen zu berücksichtigen (siehe Abbildung 5-11). Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn die nativen Relationen innerhalb des

Produktsystems oder die Zuordnungen von Prozess- bzw. Organisationssystem auf unterschiedlichen Dekompositions- oder Abstraktionsebenen modelliert sind. Wenn zum Beispiel zwei Komponenten jeweils eine Funktion erfüllen, die wiederum Teilfunktionen einer übergeordneten Funktion sind, könnte dieser Zusammenhang bei der Entwicklung der beiden Komponenten relevant sein (Beispiel 1 in Abbildung 5-11). Genauso kann es vorkommen, dass eine Funktion 1 bereits mittels einer Komponente 1 detailliert wurde, die nun entwickelt wird (Beispiel 2 in Abbildung 5-11). Eine Funktion 2 ist dagegen noch nicht weiter detailliert und wird ebenfalls weiterentwickelt. Auch solche indirekten Zusammenhänge zweiten Grades können berücksichtigt werden, indem für die in Abbildung 5-11 aufgezeigten Muster analytische Produktrelationen abgeleitet werden. Durch mehrmaliges Ausführen dieser Graphen-Transformation wäre es möglich indirekte Zusammenhänge beliebigen Grades zu identifizieren, wobei die Aussagekraft mit jedem Mal abnimmt.

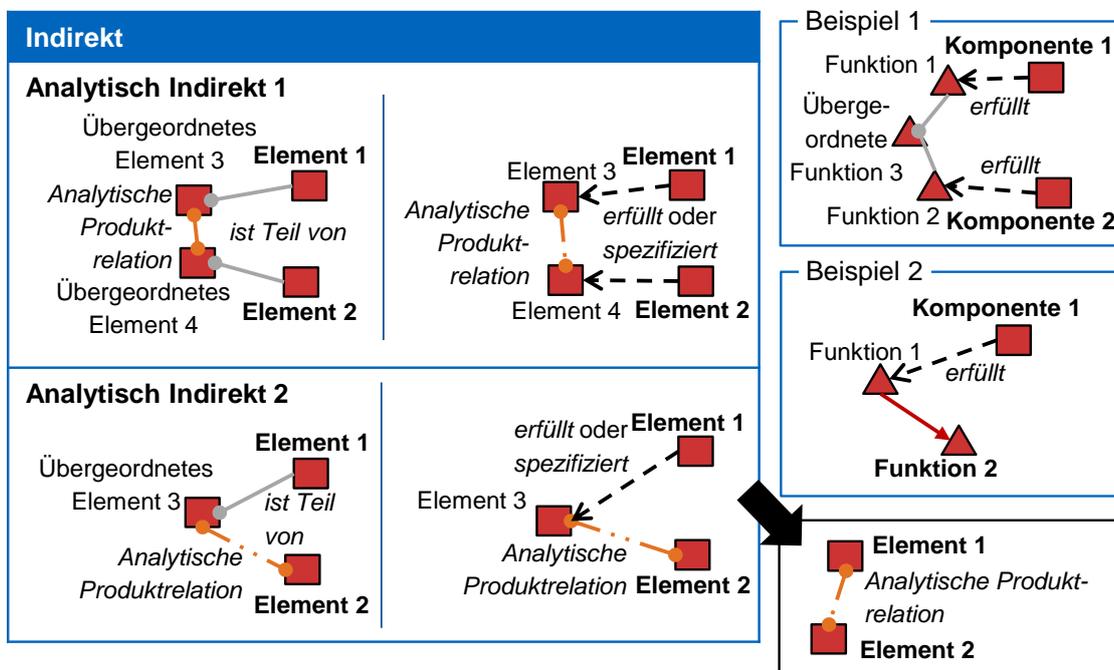


Abbildung 5-11 Weitere Muster zur Ableitung zusätzlicher analytischer Produktrelationen auf Basis zuvor abgeleiteter analytischer Produktrelationen.

### Ableitung von Abstimmungsbedarfen im Prozess- und Organisationssystem

Die ermittelten analytischen Produktrelationen werden anschließend innerhalb des Prozess- und Organisationssystems als potentieller Abstimmungsbedarf interpretiert. Dafür wird zwischen allen Elementpaaren im Prozess- bzw. Organisationssystem, die mit den voneinander abhängigen Produktelementen verbunden sind, eine Kante des Typs -:Abstimmungsbedarf erzeugt. Je nach verwendeter Verknüpfungslogik der Projektsysteme (vgl. Kapitel 5.2.5 und Abbildung 5-3) sind die Elementpaare entweder direkt (z. B. zwei Entwicklungsaktivitäten) oder indirekt über ein Elementpaar des anderen Projektsystems (z. B. zwei Personen mittels zwei Entwicklungsaktivitäten) mit den beiden Produktelementen verbunden. Analytische

Produktrelationen zwischen Elementen, die keine Relation zum Prozess- oder Organisationssystem besitzen, erzeugen entsprechend auch kein Abstimmungsbedarf.

In dem Fall, dass ein Element X (Prozesselement oder Organisationseinheit) mit beiden betroffenen Produktelementen verbunden ist, leitet sich daraus für das Element X kein Abstimmungsbedarf ab. Es wird angenommen, dass diese Abhängigkeit ohnehin adäquat adressiert wird, da die beiden Produktelemente samt Abhängigkeit von dem Element berücksichtigt werden. Es wird jedoch auf die Gefahr hingewiesen, dass nicht detailliert genug modelliert sein könnte und in der Realität doch Abstimmungsbedarf zwischen zwei Elementen X1 und X2 bestehen könnte, die jeweils Teil von Element X sind.

### Illustratives Beispiel

Abbildung 5-12 zeigt einen Auszug aus dem Datengraphen des Beispiels LEGO Bagger. Darin sind beispielhaft eine Funktion und drei Module samt nativer Zusammenhänge dargestellt. Diese werden jeweils von Entwicklungsaktivitäten adressiert, die von verschiedenen Personen bearbeitet werden.

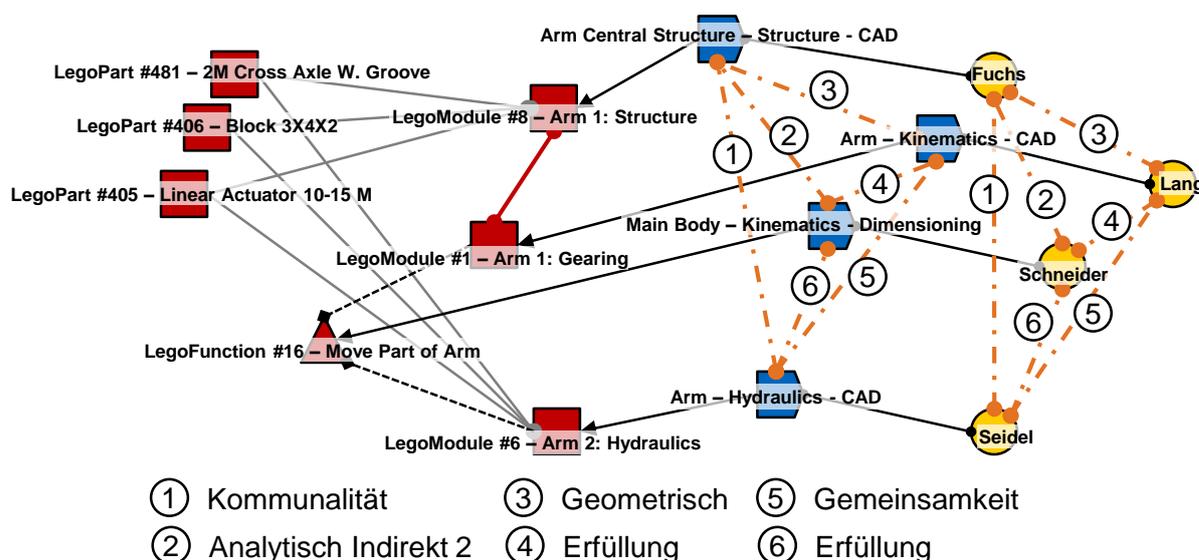


Abbildung 5-12 Beispiele für abgeleitete Abstimmungsbedarfe im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

In dieser Konstellation ergeben sich sechs verschiedene Abstimmungsbedarfe:

1. In Modul #8 und Modul #6 sind drei verschiedene Gleichteile<sup>35</sup> geplant, worüber sich die entwickelnden Personen entsprechend abstimmen müssen.
2. Modul #8 und Modul #1 haben eine direkte Relation, während Modul #1 Funktion #16 erfüllt. Entsprechend muss Modul #8 eventuell bei der Dimensionierung des Bagger-Grundkörpers zur Detaillierung von Funktion #16 berücksichtigt werden.

<sup>35</sup> Im LEGO Beispiel sollen die in mehreren Modulen verbauten LEGO-Standardteile hypothetisch als Gleich- bzw. Wiederholteile verstanden werden.

3. Die Personen Fuchs und Schneider müssen sich bezüglich der geometrischen Schnittstelle im Rahmen der CAD-Konstruktion abstimmen.
4. Bei der Dimensionierung des Bagger-Grundkörpers zur Detaillierung von Funktion #16 muss Modul #1 berücksichtigt werden, das an der Erfüllung der Funktion beteiligt ist.
5. Analog zu 4. für Modul #6.
6. Modul #1 und Modul #6 sind gemeinsam an der Erfüllung von Funktion #16 beteiligt und erzeugen diesbezüglich potentiellen Abstimmungsbedarf.

Das Beispiel zeigt bereits, dass durch die umfassende Betrachtung denkbarer technologischer Abhängigkeiten die Anzahl ableitbarer potentieller Abstimmungsbedarfe sehr hoch ist. Verschiedene strukturelle Merkmale können jedoch dabei helfen die Abstimmungsbedarfe zu priorisieren, um tatsächliche Koordinationsbedarfe für die Planung von Koordinationsmaßnahmen zu identifizieren.

### **Strukturelle Merkmale zur Bewertung der Abstimmungsbedarfe**

Bei komplexen Entwicklungsprojekten wird die Anzahl abgeleiteter Abstimmungsbedarfe aufgrund der Vielzahl von Elementen und Relationen sehr hoch. Gleichzeitig kann in der Praxis beobachtet werden, dass ein Großteil dieser Abstimmungsbedarfe ohnehin automatisch oder selbstverständlich adressiert wird, da die notwendigen Abstimmungen in der Prozess- und Organisationsstruktur vorgesehen sind. Es müssen also nicht alle theoretisch denkbaren Abstimmungsbedarfe explizit adressiert werden, sondern nur diejenigen, mit denen ein hohes Risiko für unzureichende oder fehlende Abstimmung einhergeht. Im Folgenden wird aufgezeigt, dass strukturelle Merkmale als Indikatoren zur entsprechenden Bewertung von Abstimmungsbedarfen dienen können.

### **Kritikalität und Degree Centrality als Indikatoren für die Wichtigkeit eines Bedarfs**

Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Abstimmungsbedarf umso wichtiger ist, je zentraler die daran beteiligten Elemente im Projektsystem sind. Als ein Indikator für die Wichtigkeit eignet sich also die Kritikalität der betroffenen Produktelemente [Gokpinar *et al.* 2010, S. 469-470]. Je kritischer ein Produktelement im Produktsystem ist, desto umfangreicher sind mögliche Auswirkungen bei nachträglichen Anpassungen [Lindemann *et al.* 2009, S. 130], die durch Fehler oder Nacharbeit aufgrund unzureichender oder fehlender Abstimmung notwendig werden. Da bezüglich eines Abstimmungsbedarfs immer zwei Produktelemente mit eigener Kritikalität betrachtet werden müssen, werden die beiden Werte zur Bildung eines Indikators für die Wichtigkeit des Abstimmungsbedarfs gemittelt. Es wird deshalb der Mittelwert gebildet, weil die Wichtigkeit bezogen auf zwei Produktelemente mittlerer Kritikalität in etwa gleich hoch sein soll, wie die Wichtigkeit bezogen auf ein sehr kritisches Produktelement, das eine Relation zu einem weniger kritischen Produktelement besitzt.

Die Kritikalität von Produktelementen wird auf Basis der Aktiv- und Passivsumme in einer Einflussmatrix berechnet [Lindemann *et al.* 2009, S. 130]. Das heißt die modellierten Relationen stehen konkret für gegenseitige Einflüsse der Elemente bei Veränderungen. Diese Informationen liegen in vorhandenen Produktdaten in der Regel nicht explizit vor. Es wird jedoch argumentiert, dass jede Relation in den nativen Daten des Produktsystems als eine Art Einfluss aufeinander interpretiert werden kann. Folglich wird die Kritikalität eines Elements in

dieser Arbeit basierend auf allen nativen, direkten Produktrelationen (geometrische Bedingungen, kybernetische Flüsse) berechnet, wobei eine geometrische Bedingung (ungerichtete Kante) als ausgehende Kante (Aktivsumme) und als eingehende Kante (Passivsumme) gezählt wird (Abbildung 5-13, links).

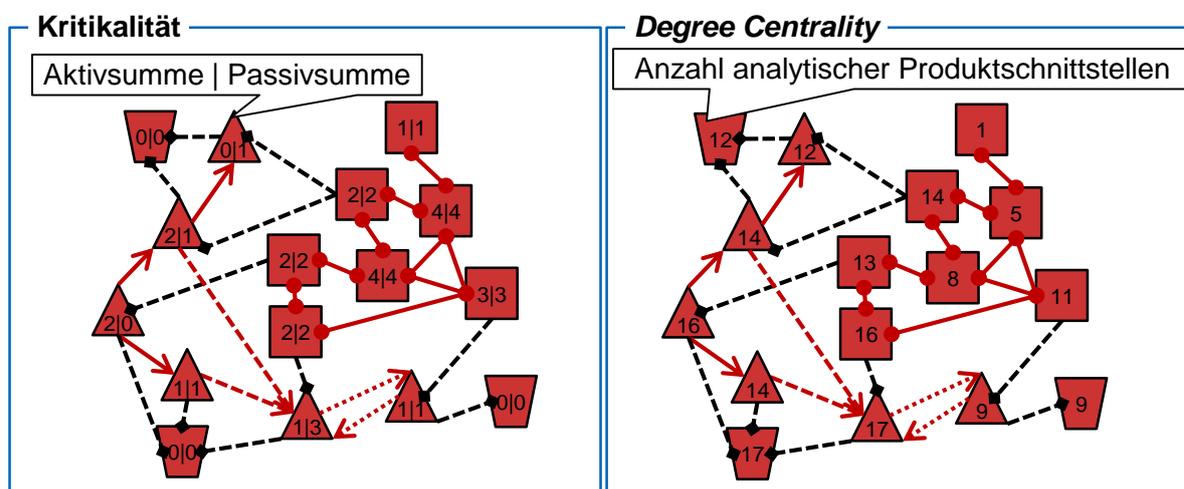


Abbildung 5-13 Links: Berechnung von Aktiv- und Passivsumme basierend auf allen nativen Produktrelationen. Rechts: Anzahl ableitbarer analytischer Produktrelationen.

Neben der Kritikalität basierend auf nativen Daten kann auch die Betrachtung der Anzahl abgeleiteter analytischer Produktrelationen für jeden Knoten interessant sein (*Degree Centrality*). So könnte ein Produktelement zwar wenige direkte Relationen besitzen, aber dank indirekter Zusammenhänge eine sehr zentrale Rolle im Produktsystem spielen (Abbildung 5-13, rechts).

### Distanz als Indikator für den Widerstand der Koordination

Es wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Koordination steigt, umso näher zwei Elemente in der Projektstruktur zusammen liegen. Beispielsweise ist es naheliegend, dass die Koordination zwischen zwei Personen begünstigt ist, wenn sie Teil desselben Teams sind. Im Gegensatz dazu könnte eine erfolgreiche Abstimmung eher verhindert sein, wenn diese zwei Personen komplett unterschiedlichen Abteilungen angehören, die keine direkten organisationalen Schnittstellen haben (siehe Abbildung 5-14, links). Der Widerstand lässt sich folglich über die strukturelle Distanz zwischen zwei Organisationseinheiten (**organisationale Distanz**) oder Prozesselementen (**prozessuale Distanz**) berechnen. Normalerweise wird zur Berechnung der Distanz zwischen zwei Knoten die Kantenrichtung berücksichtigt [Lindemann *et al.* 2009, S. 217]. Für diese Arbeit wird die Berechnung der Distanz zwischen zwei Prozesselementen oder Organisationseinheiten etwas angepasst. Die organisationale Distanz soll, wie im obigen Beispiel angedeutet, ein Indikator für die Entfernung zwischen zwei Organisationseinheiten in der Organisationsstruktur darstellen. Sie wird daher als die Anzahl der Kanten (ungeachtet ihrer Richtung) des kürzesten Pfads zwischen zwei Organisationseinheiten definiert. So ergibt sich im Beispiel a) und b) in Abbildung 5-14 eine orga-

nisationale Distanz von 2 zwischen Knoten A und B und eine organisationale Distanz von 6 zwischen Knoten A und C.

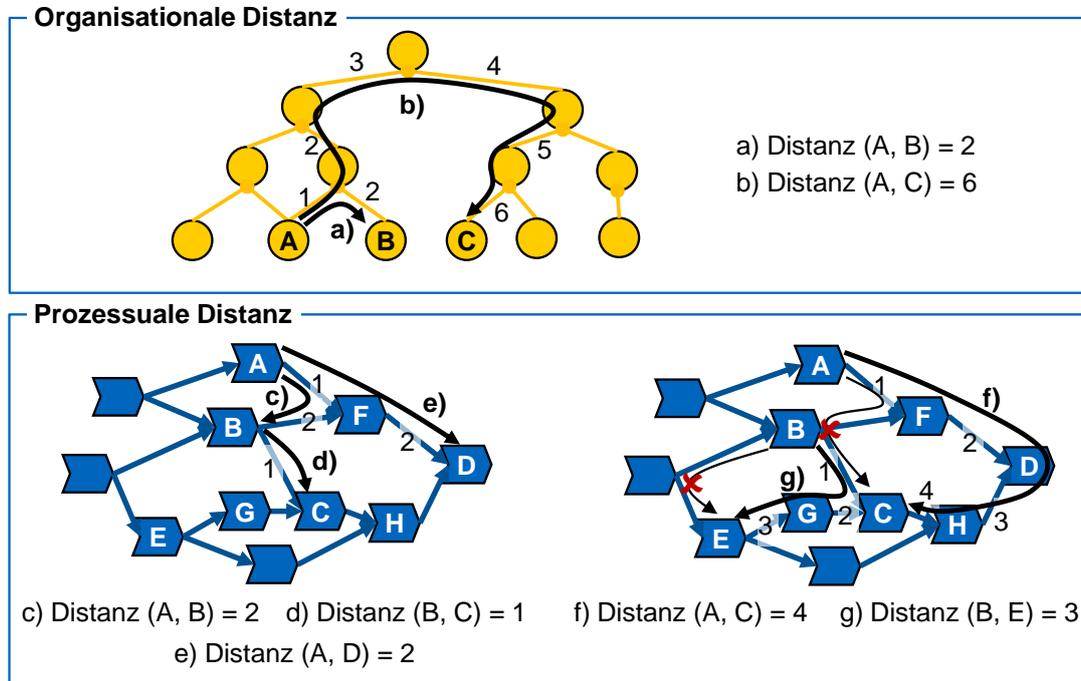


Abbildung 5-14 Illustration der Berechnung der Distanz zwischen zwei Elementen im Organisationssystem (oben) und Prozesssystem (unten).

Im Prozesssystem spielt die Richtung der Verbindungskanten dagegen eine wichtige Rolle. Zwei Prozesse mit einem gemeinsamen Vorgängerprozess müssen nicht zwangsläufig etwas miteinander zu tun haben und könnten völlig unabhängig voneinander ausgeführt werden. Erst wenn die zwei parallelen Prozessströme wieder in der zeitlich-logischen Reihenfolge aufeinander treffen, besteht dadurch ein indirekter Zusammenhang zwischen den beiden Prozessen. Die prozessuale Distanz kann dann so interpretiert werden, dass sie ein Indikator dafür ist, wie „schnell“<sup>36</sup> im Prozessverlauf eine fehlende oder unzureichende Abstimmung auffällt. Sie berechnet sich somit aus der Anzahl der Kanten auf dem kürzesten Pfad zwischen zwei Prozesselementen, wobei sich dieser Pfad aus zwei Pfaden mit nur ausgehenden Kanten bis zu einem dritten Prozesselement zusammensetzt. Im Beispiel c) in Abbildung 5-14 ist die prozessuale Distanz zwischen A und B gleich 2, weil die beiden Prozessströme sich in F treffen. Die Distanz zwischen B und C (Beispiel d) ist gleich 1, weil die beiden Prozesselemente direkt in Verbindung stehen. Für A und D (Beispiel e) ergibt sich die prozessuale Distanz zu 2. Die Beispiele f) und g) zeigen Sonderfälle auf. Die Verbindung zwischen A und C ist nur über das prozessstromabwärts liegende D möglich, woraus sich eine Distanz von 4 ergibt (der kürzeste gültige Pfad lautet A-F-D-H-C). Der direktere Pfad A-F-B-C enthält einen Anteil

<sup>36</sup> Das Wort „schnell“ ist hier nicht im rein zeitlichen Sinne zu verstehen. Es bezieht sich mehr darauf, wie viele Prozessschritte zwei zu koordinierende Prozessschritte in der logischen Abfolge voneinander trennen.

entgegen des logischen Prozessstroms (F-B) und wird deshalb nicht berücksichtigt. Analog ergibt sich die Distanz zwischen B und E zu 3 (Pfad B-C-G-E).

### Anzahl der abgeleiteten Abstimmungsbedarfe zwischen Prozesselementen bzw. Organisationseinheiten als Indikator für Handlungsbedarf

Bei der Ableitung von Abstimmungsbedarf werden zwischen zwei Produktelementen bzw. Organisationseinheiten in der Regel mehrere Bedarfe identifiziert (Abbildung 5-15, links). Das liegt daran, dass es zwischen zwei Produktelementen eine Vielzahl direkter und indirekter Zusammenhänge geben kann und dass Prozesselemente bzw. Organisationseinheiten häufig mit mehreren Produktelementen in Verbindung stehen. Die Anzahl dieser Bedarfe zwischen zwei Elementen ist letztlich auch ein Indikator dafür, wie wichtig die Berücksichtigung der Koordination der beiden Elemente bei der Planung ist.

### Nähe als Indikator für begünstigte Koordination

In der Soziologie (Beziehungsforschung) wird die Anzahl der Aktivitäten, die zwei Personen gemeinsam ausführen als Nähe (engl. *closeness*) bezeichnet (z. B. Laursen & Jensen-Cambell [1999]). In Bezug auf einen Abstimmungsbedarf zwischen zwei Personen wird im Kontext dieser Arbeit argumentiert, dass eine solche Nähe eine notwendige Abstimmung begünstigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass Personen, die in einem Entwicklungsprojekt viel zusammenarbeiten, in regem Austausch miteinander stehen. Somit wäre der Widerstand für eine erfolgreiche Abstimmung zwischen diesen Personen geringer als bei Personen, die weniger zusammenarbeiten. In Abbildung 5-15 (rechts) ist eine beispielhafte Berechnung der Werte illustriert. Während B-C und D-F nur in jeweils einer Aktivität gemeinsam involviert sind, arbeiten A-B in zwei und D-E in drei Aktivitäten zusammen.

Es sei darauf hingewiesen, dass sich diese Definition von Nähe als **Grad der allgemeinen Zusammenarbeit** von den Definitionen der Netzwerktheorie für *closeness centrality* [Wasserman & Faust 1994, S. 183-188] oder des strukturellen Komplexitätsmanagement für *closeness* [Lindemann *et al.* 2009, S. 129] unterscheidet.

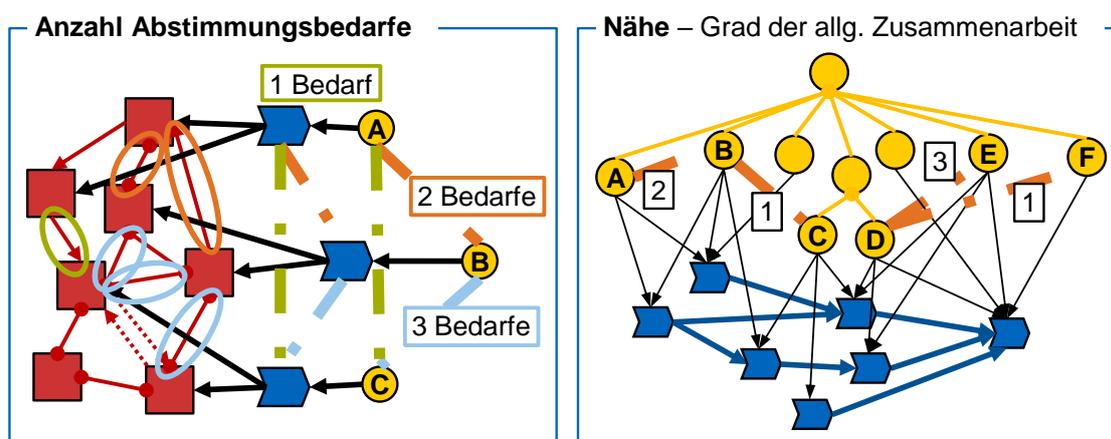


Abbildung 5-15 Illustration der Berechnung der Anzahl Abstimmungsbedarfe (links) und der Nähe zwischen Organisationseinheiten (rechts).

### Berechnung der Indikatoren und Bewertung

Die strukturellen Merkmale werden automatisiert mittels definierten Regeln und Algorithmen berechnet. Die Kritikalität eines Produktelements wird als Attribut des jeweiligen Knotens gespeichert. Die gemittelte Kritikalität zweier Produktelemente, die Abstimmungsbedarfe erzeugen, wird als Attribut der jeweiligen Abstimmungsbedarfs-Kanten gespeichert. Die Distanz, die Anzahl der Abstimmungsbedarfe und die Nähe (nur zwischen Organisationseinheiten) sind Attribute einer aggregierten Abstimmungsbedarfs-Kante zwischen zwei Elementen, in der alle einzelnen Abstimmungsbedarfe zusammengefasst sind.

Hinsichtlich des Ziels, einer Projektmanagerin bzw. einem Projektmanager diejenigen Abstimmungsbedarfe aufzuzeigen, für die die explizite Planung von Koordinationsmaßnahmen sinnvoll sein könnte, sollen die abgeleiteten Abstimmungsbedarfe mit Hilfe der Indikatoren priorisiert werden. Die Bewertung kann auf zwei Ebenen stattfinden: Einerseits lässt sich die **Relevanz einzelner Abstimmungsbedarfe** betrachten, andererseits kann das **Alignment für die Gesamtheit aller Abstimmungsbedarfe zwischen einem Elementpaar** aus dem Prozess- oder Organisationssystem untersucht werden. Bei den betrachteten Werten handelt es sich um absolute Größen, die jeweils in Relation zu den anderen Werten betrachtet werden müssen.

Die Relevanz eines Abstimmungsbedarfs im Sinne der Koordinationsplanung setzt sich dabei aus der **Wichtigkeit eines Bedarfs** und dem **Widerstand der Koordination** zusammen. Als mögliche Indikatoren für die Wichtigkeit eines Abstimmungsbedarfs werden die gemittelte Kritikalität und *Degree Centrality* der verursachenden Produktelemente vorgeschlagen. Die Indikatoren Distanz und Nähe geben Aufschluss über den Widerstand gegen eine effektive und effiziente Abstimmung. Eine hohe Distanz entspricht dabei einem hohen Widerstand, ein hoher Nähe-Wert verringert dagegen den Widerstand. Die einzelnen Indikatoren werden nicht weiter zu einer zusammengefassten Kennzahl für die Relevanz berechnet. Dafür sind die individuellen Bedeutungen der Indikatoren zu stark von der vorhandenen Datengrundlage und der spezifischen Situation abhängig. Für den hier vorgestellten Ansatz werden die einzelnen Indikatoren übersichtlich dargestellt und ermöglichen so eine individuelle Interpretation der Werte.

Zur gesamtheitlichen Betrachtung des Projektsystems und der grundsätzlichen Voraussetzungen für effektive und effiziente Abstimmung erscheint es vielversprechend die jeweils zu koordinierenden Elementpaare zu betrachten. Maßgebliche Größe ist hier die Anzahl der ermittelten Abstimmungsbedarfe, die ein Indikator für die notwendige Abstimmungsintensität zwischen den beiden Elementen ist. Gleichzeitig indiziert die Distanz der beiden Elemente, wie günstig die Rahmenbedingungen für die Abstimmung sind. Die beiden Indikatoren werden zu einer Kennzahl zusammengefasst, die es ermöglichen soll auf einen Blick eine Einschätzung für das Alignment zwischen Elementpaaren zu erlangen:

$$\text{Alignment} = (\text{Anzahl Abstimmungsbedarfe}) \cdot (\text{Distanz})^2$$

Die beiden Indikatoren werden miteinander multipliziert, weil zu erwarten ist, dass die Wertebereiche der Indikatoren unterschiedliche Größenordnungen haben und die Werte stark variieren. Die Distanz wird zum Beispiel in den meisten Fällen geringer als 10 ausfallen. Die Anzahl Abstimmungsbedarfe kann dagegen auch größer als 100 sein. Um der Distanz entspre-

chend mehr Gewicht zu verleihen, wird diese deshalb zusätzlich quadriert. Die resultierende Kennzahl ist als grober Richtwert zu verstehen und muss in Relation zu den Werten für andere Elementpaare betrachtet werden.

### Visualisierung der Ergebnisse

Der letzte Baustein der Analyse adressiert die Visualisierung der Ergebnisse. Der vollständige Datengraph eines komplexen Projektsystems ist aufgrund der Vielzahl an Elementen und Relationen unübersichtlich. Im Rahmen der Analyse werden jedoch Daten erzeugt, die durch eine gezielte Aufbereitung bzw. Filterung sinnvoll genutzt werden können. Hierbei wird zunächst die globale und lokale Perspektive unterschieden. Die **globale Perspektive** richtet sich an Projektmanagerinnen und Projektmanager bzw. Personen, die sich einen Gesamtüberblick verschaffen möchten und auf übergeordneter Ebene die Koordination im Gesamtprojekt sicherstellen wollen. Die **lokale Perspektive** fokussiert auf das direkte Umfeld eines Elements im Projektsystem und blendet das restliche System aus. Sie richtet sich an Projektmitarbeiterinnen und -mitarbeiter, die an der jeweils notwendigen Abstimmung selbst beteiligt sind. Für sie sind nur diejenigen Abstimmungsbedarfe und Elemente im Projektsystem interessant, die sie selbst betreffen. Diese Sichtweise unterstützt damit einerseits die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter direkt in ihrer täglichen Arbeit, und erleichtert es andererseits im Falle einer ausfallenden Mitarbeiterin bzw. eines ausfallenden Mitarbeiters sich gezielt über die Einbettung dieser bzw. dessen im Projektsystem zu informieren. Weiterhin können auch andere Elemente des Projektsystems (z. B. bestimmte Prozessschritte oder Produktelemente) und deren direktes Umfeld aus der lokalen Perspektive untersucht werden.

Insgesamt gibt es mehrere Möglichkeiten zur Darstellung der im Projektgraphen enthaltenen Daten, die für verschiedene Anwendungsfälle beliebig gestaltet werden können. Im Folgenden wird ein Überblick über Vorschläge zur übersichtlichen Visualisierung der Daten präsentiert, die bei der Koordinationsplanung sowohl global als auch lokal unterstützen sollen und automatisiert erzeugt werden können. Die einzelnen Darstellungen werden zur Erläuterung der Interpretation anhand des Beispiels LEGO Bagger detaillierter betrachtet.

#### Globale Perspektive

Die globale Perspektive zielt darauf ab einen Überblick über das gesamte Projektsystem und beinhaltende potentielle Abstimmungsbedarfe zu verschaffen. Insgesamt werden vier Ansichten vorgeschlagen (Abbildung 5-16):

- **Portfolio-Darstellung Produktsystem** (Einflussportfolio): Die Elemente des Produktsystems werden in einem Portfolio im Sinne eines Einflussportfolios aufgetragen, um die Rolle der einzelnen Elemente innerhalb des Produktsystems zu beurteilen. Auf der x-Achse ist die Aktivsumme und auf der y-Achse ist die Passivsumme (jeweils bezogen auf native Produktabhängigkeiten) aufgetragen. Der Kreisdurchmesser eines Produktelements im Portfolio ist relativ zur Anzahl analytischer Produktrelationen. Neben der Bereitstellung einer Übersicht über die Kritikalität der Produktelemente eignet sich die Darstellung auch dazu, die zugrundeliegenden Daten auf Plausibilität zu prüfen.
- **Tabellarische Auflistung der Abstimmungsbedarfe**: Die einzelnen ermittelten Abstimmungsbedarfe lassen sich in einer Tabelle anzeigen. Dadurch wird es möglich, für je-

den einzelnen Abstimmungsbedarf weitere Details einzusehen. Durch Sortierung der Einträge nach gemittelter Kritikalität und Distanz können die relevantesten Abstimmungsbedarfe identifiziert werden.

- **Alignment-Matrix:** Die berechneten Werte für das Alignment zwischen allen Elementpaaren werden in den Zellen einer symmetrischen DSM dargestellt. Eine zusätzliche Spalte gibt für jedes Element die absolute Anzahl der Abstimmungsbedarfe an, an denen es beteiligt ist. Elemente bzw. Elementpaarungen mit relativ hohen Werten werden sofort ersichtlich, indem die Zellen je nach Höhe des Werts eingefärbt werden.
- **Graph-Ansichten des Projektsystems:** Die Graph-Ansicht des kompletten Projektsystems ist aufgrund der Vielzahl der Knoten und Kanten unübersichtlich. Es können jedoch gezielt einzelne Knoten und Kanten oder ganze Knoten- und Kantenklassen ausgeblendet werden. Zusätzlich kann das Erscheinungsbild der Knoten und Kanten (Größe, Farbe) anhand von Attributwerten automatisch angepasst werden. Beispielsweise kann analog zur Alignment-Matrix die absolute Anzahl der Abstimmungsbedarfe für jedes Element bzw. Elementpaar in einer Graph-Ansicht veranschaulicht werden. Die Anzahl kann darin in der Größe eines Knotens bzw. in der Dicke einer Kante dargestellt werden. Zusätzlich können weitere Elemente und strukturelle Zusammenhänge des Projektsystems (wie z. B. die Abteilungsstruktur) gezielt ein- oder ausgeblendet werden.

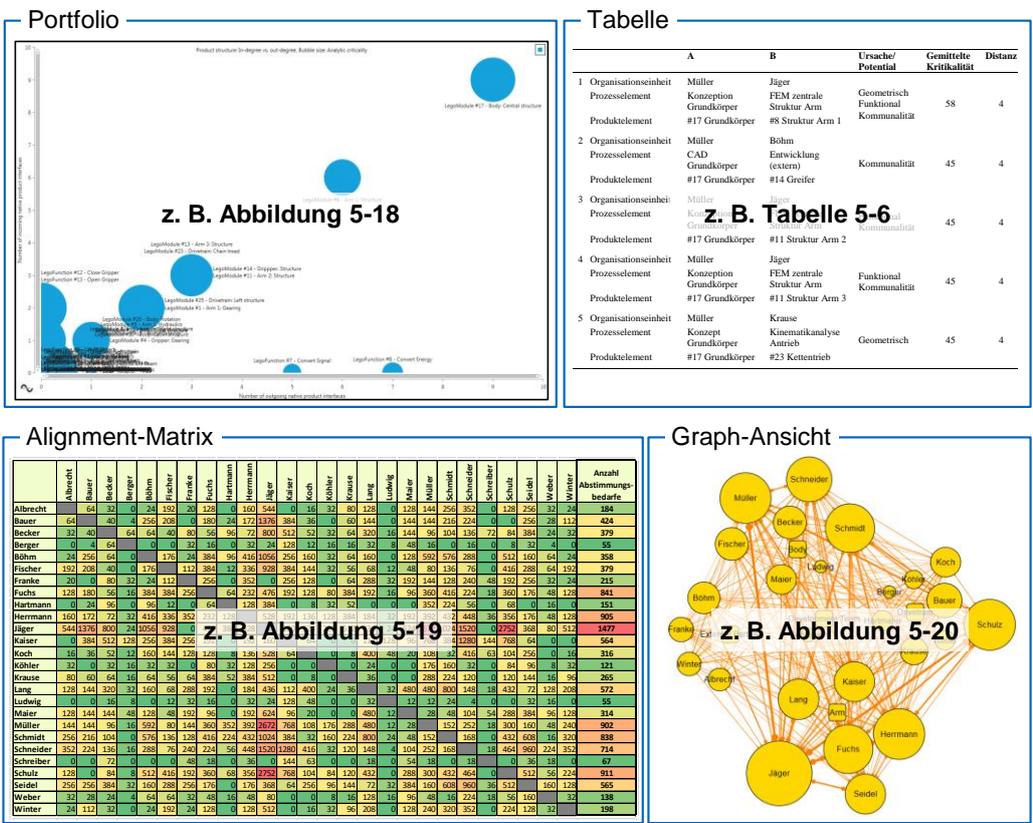


Abbildung 5-16 Vorschläge für mögliche Ansichten der Projektdaten aus globaler Perspektive.



Abstimmungsbedarf die Art der zu Grunde liegenden technisch-logischen Abhängigkeit hinterlegt. Weitere mögliche Hintergrundinformationen zu jedem Abstimmungsbedarf sind stark von den Daten abhängig, die im Vorbereitungsschritt in die Strukturmodelle mit eingeflossen sind. Deren Weiterverwendung und Zuordnung zu abgeleiteten Abstimmungsbedarfen muss individuell implementiert werden.

### Interpretation der Analyseergebnisse

Anhand des Beispiel LEGO Bagger wird im Folgenden aufgezeigt, wie Analyseergebnisse des Ansatzes im Allgemeinen interpretiert werden können. Neben der Portfolio-Darstellung des Produktsystems und der Alignment-Matrix (globale Perspektive) werden beispielhafte Auszüge aus den erzeugten Daten für detailliertere Analysen (globale und lokale Perspektive) diskutiert.

### Portfolio-Darstellung Produktsystem

Die Portfolio-Darstellung gibt einen guten Überblick über die Rolle der einzelnen Elemente des Produktsystems und ermöglicht eine erste Prüfung der Plausibilität der Datengrundlage. Verhältnismäßig kritische Elemente erscheinen rechts oben im Portfolio und fallen sofort auf. Genauso werden besonders passive Elemente links oben und besonders aktive Elemente rechts unten im Portfolio ersichtlich. Allgemein kann folgende Fragestellung für die Interpretation des Portfolios formuliert werden: Ist die Rolle (kritisch, aktiv, passiv) und die Anzahl analytischer Produktrelationen der Elemente plausibel und passt zum eigenen Grundverständnis über das Produkt?

Im Beispiel stellt der **zentrale Grundkörper** des LEGO Baggers aufgrund der hohen Anzahl geometrischer Bedingungen zum Restsystem das kritischste Produktelement dar (Abbildung 5-18). Auch der **erste Teil des Arms** weist mehr geometrische Schnittstellen auf als andere Elemente. Bezüglich der modellierten Funktionen und kybernetischen Flüssen stechen die Funktionen **Energie wandeln** und **Signal wandeln** hervor. Sie haben eine relativ hohe Aktivsumme, das heißt viele andere Funktionen sind von ihnen abhängig, weil sie für diese Energie bzw. Signale bereitstellen.

Ein detaillierterer Blick auf die restlichen Elemente links unten im Portfolio zeigt, dass der Greifer, der Kettentrieb, Arm 2 und Arm 3 auch zu den eher kritischen Elementen zählen. Das ist insofern interessant, weil der Greifer von einem externen Entwicklungspartner entwickelt werden soll und in Bezug auf die notwendige Abstimmung eine wichtige Rolle spielen kann. Insgesamt wird ersichtlich, dass viele Elemente in Bezug auf native Abhängigkeiten zwar weniger kritisch erscheinen, jedoch eine nahezu gleich hohe Anzahl analytischer Produktrelationen besitzen wie kritischere Elemente (siehe Durchmesser der Datenpunkte im Portfolio). Das heißt sie spielen zwar eine weniger entscheidende Rolle bezüglich des konkreten Einflusses der Elemente aufeinander, müssen aber hinsichtlich mehrerer indirekter Zusammenhänge während der Entwicklung auf andere Elemente abgestimmt werden.

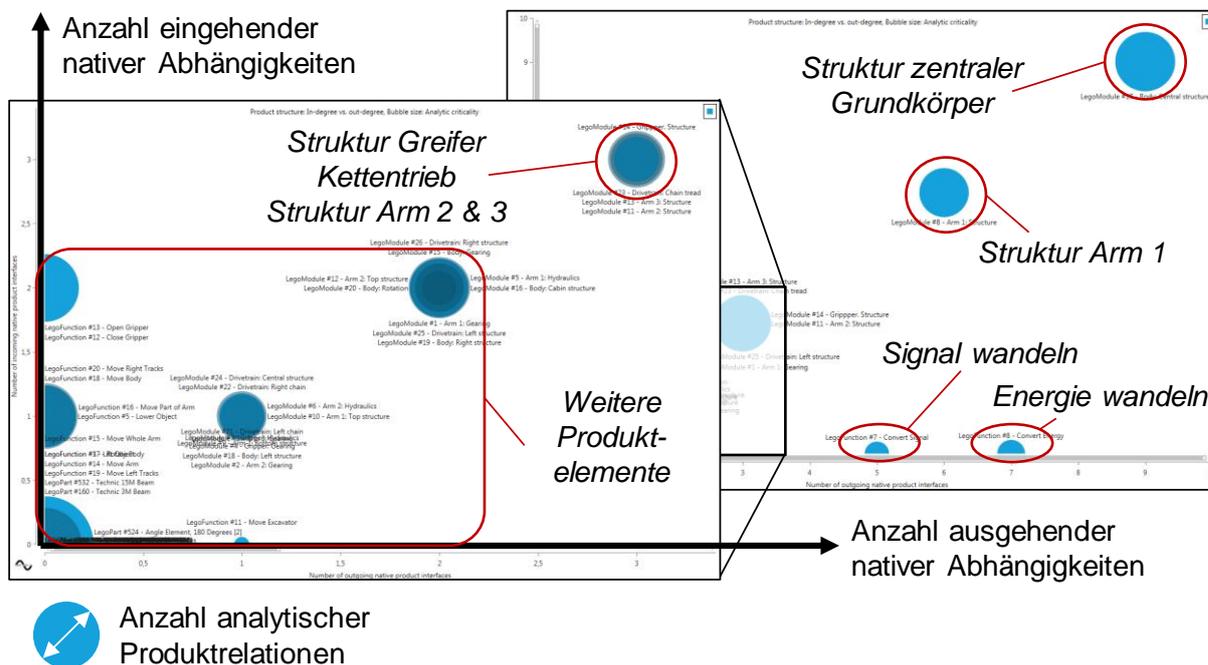


Abbildung 5-18 Einflussportfolio im Beispiel LEGO Bagger.

## Alignment-Matrix

Die Alignment-Matrix zeigt auf einem Blick, zwischen welchen Elementpaaren besonderer Handlungsbedarf zur gezielten Planung von Koordinationsmaßnahmen besteht. Die Werte sollten jedoch auch hier zunächst auf Plausibilität überprüft werden. Theoretisch ist es möglich die Alignment-Matrix sowohl aus Prozesssicht als auch aus Organisationsicht zu erstellen. Die nachfolgenden Beispiele sind jedoch auf die Organisationsicht reduziert, da diese einerseits vielversprechender erscheint und andererseits allgemeingültiger beschrieben werden kann. Die Interpretationsmöglichkeiten der Werte in einer Alignment-Matrix aus Prozesssicht müssen aufgrund der Variation denkbarer Datengrundlagen aus unterschiedlichen Prozessmodellen für konkrete Anwendungsfälle spezifisch erarbeitet werden.

Generell deutet ein hoher Alignment-Wert zwischen Elementpaaren darauf hin, dass zwischen ihnen eine hohe Anzahl potentieller Abstimmungsbedarfe besteht, diese aber in der Projektstruktur gleichzeitig eine hohe Distanz zueinander aufweisen. Im Organisationssystem kann es dann sinnvoll sein, die Distanz zwischen Organisationseinheiten durch strukturelle Veränderungen zu reduzieren (z. B. Änderung der Teamzuordnung oder Bildung abteilungsübergreifender Teams). Alternativ könnte beispielsweise auch ein regelmäßiges Abstimmungstreffen zwischen den Organisationseinheiten als Koordinationsmaßnahme geplant werden. Man beachte, dass ein Alignment-Wert von 0 bedeutet, dass kein Abstimmungsbedarf für das jeweilige Elementpaar abgeleitet wurde.

Darüber hinaus ist die absolute Anzahl der Abstimmungsbedarfe eines Elements ein Hinweis darauf, welche Rolle das Element im Projektsystem spielt. Elemente mit hoher Anzahl sind

als zentraler und wichtiger zu sehen. Im Organisationssystem könnte das bedeuten, dass ein Ausfall einer Person mit viel Abstimmungsbedarf weitreichende Konsequenzen für das Gesamtprojekt hat. Außerdem ist die Anzahl ein Indikator dafür, wie hoch der Anteil für Abstimmungsaufwand an der gesamten Arbeitskapazität einer Organisationseinheit ist.

Im illustrativen Beispiel stechen vor allem die Personenpaare **Jäger-Müller** und **Jäger-Schulz** hervor, die jeweils unterschiedlichen Abteilungen angehören (Distanz = 4) und verhältnismäßig viele Abstimmungsbedarfe miteinander aufweisen (Abbildung 5-19). Die Person Jäger ist Leiter des Teams zur Entwicklung des Arms und ist für die Konzeption des Arms verantwortlich. Müller und Schulz verantworten die Konstruktion des Grundkörpers bzw. des Kettentriebs und müssen entsprechend zahlreiche potentielle Zusammenhänge mit dem Arm berücksichtigen. Insgesamt ist Jäger bezüglich der Konzeption des Arms von einer beachtlichen Anzahl an Abstimmungsbedarfen betroffen und spielt eine zentrale Rolle im Projekt.

|           | Albrecht | Bauer | Becker | Berger | Böhm | Fischer | Franke | Fuchs | Hartmann | Herrmann | Jäger | Kaiser | Koch | Köhler | Krause | Lang | Ludwig | Maier | Müller | Schmidt | Schneider | Schreiber | Schulz | Seidel | Weber | Winter | Anzahl Abstimmungsbedarfe |
|-----------|----------|-------|--------|--------|------|---------|--------|-------|----------|----------|-------|--------|------|--------|--------|------|--------|-------|--------|---------|-----------|-----------|--------|--------|-------|--------|---------------------------|
| Albrecht  |          | 64    | 32     | 0      | 24   | 192     | 20     | 128   | 0        | 160      | 544   | 0      | 16   | 32     | 80     | 128  | 0      | 128   | 144    | 256     | 352       | 0         | 128    | 256    | 32    | 24     | 184                       |
| Bauer     | 64       |       | 40     | 4      | 256  | 208     | 0      | 180   | 24       | 172      | 1376  | 384    | 36   | 0      | 60     | 144  | 0      | 144   | 144    | 216     | 224       | 0         | 0      | 256    | 28    | 112    | 424                       |
| Becker    | 32       | 40    |        | 64     | 64   | 40      | 80     | 56    | 96       | 72       | 800   | 512    | 52   | 32     | 64     | 320  | 16     | 144   | 96     | 104     | 136       | 72        | 84     | 384    | 24    | 32     | 379                       |
| Berger    | 0        | 4     | 64     |        | 0    | 0       | 32     | 16    | 0        | 32       | 24    | 128    | 12   | 16     | 16     | 32   | 8      | 48    | 16     | 0       | 16        | 0         | 8      | 32     | 4     | 0      | 55                        |
| Böhm      | 24       | 256   | 64     | 0      |      | 176     | 24     | 384   | 96       | 416      | 1056  | 256    | 160  | 32     | 64     | 160  | 0      | 128   | 592    | 576     | 288       | 0         | 512    | 160    | 64    | 24     | 358                       |
| Fischer   | 192      | 208   | 40     | 0      | 176  |         | 112    | 384   | 12       | 336      | 928   | 384    | 144  | 32     | 56     | 68   | 12     | 48    | 80     | 136     | 76        | 0         | 416    | 288    | 64    | 192    | 379                       |
| Franke    | 20       | 0     | 80     | 32     | 24   | 112     |        | 256   | 0        | 352      | 0     | 256    | 128  | 0      | 64     | 288  | 32     | 192   | 144    | 128     | 240       | 48        | 192    | 256    | 32    | 24     | 215                       |
| Fuchs     | 128      | 180   | 56     | 16     | 384  | 384     | 256    |       | 64       | 232      | 476   | 192    | 128  | 80     | 384    | 192  | 16     | 96    | 360    | 416     | 224       | 18        | 360    | 176    | 48    | 128    | 841                       |
| Hartmann  | 0        | 24    | 96     | 0      | 96   | 12      | 0      | 64    |          | 128      | 384   | 0      | 8    | 32     | 52     | 0    | 0      | 0     | 352    | 224     | 56        | 0         | 68     | 0      | 16    | 0      | 151                       |
| Herrmann  | 160      | 172   | 72     | 32     | 416  | 336     | 352    | 232   | 128      |          | 528   | 192    | 136  | 128    | 384    | 184  | 32     | 192   | 392    | 432     | 448       | 36        | 356    | 176    | 48    | 128    | 905                       |
| Jäger     | 544      | 1376  | 800    | 24     | 1056 | 928     | 0      | 476   | 384      | 528      |       | 160    | 528  | 256    | 512    | 436  | 24     | 624   | 2672   | 1024    | 1520      | 0         | 2752   | 368    | 80    | 512    | 1477                      |
| Kaiser    | 0        | 384   | 512    | 128    | 256  | 384     | 256    | 192   | 0        | 192      | 160   |        | 64   | 0      | 0      | 112  | 128    | 96    | 768    | 384     | 1280      | 144       | 768    | 64     | 0     | 0      | 564                       |
| Koch      | 16       | 36    | 52     | 12     | 160  | 144     | 128    | 128   | 8        | 136      | 528   | 64     |      | 0      | 8      | 400  | 48     | 20    | 108    | 32      | 416       | 63        | 104    | 256    | 0     | 16     | 316                       |
| Köhler    | 32       | 0     | 32     | 16     | 32   | 32      | 0      | 80    | 32       | 128      | 256   | 0      | 0    |        | 0      | 24   | 0      | 0     | 176    | 160     | 32        | 0         | 84     | 96     | 8     | 32     | 121                       |
| Krause    | 80       | 60    | 64     | 16     | 64   | 56      | 64     | 384   | 52       | 384      | 512   | 0      | 8    | 0      |        | 36   | 0      | 0     | 288    | 224     | 120       | 0         | 120    | 144    | 16    | 96     | 265                       |
| Lang      | 128      | 144   | 320    | 32     | 160  | 68      | 288    | 192   | 0        | 184      | 436   | 112    | 400  | 24     | 36     |      | 32     | 480   | 480    | 800     | 148       | 18        | 432    | 72     | 128   | 208    | 572                       |
| Ludwig    | 0        | 0     | 16     | 8      | 0    | 12      | 32     | 16    | 0        | 32       | 24    | 128    | 48   | 0      | 0      | 32   |        | 12    | 12     | 24      | 4         | 0         | 0      | 32     | 16    | 0      | 55                        |
| Maier     | 128      | 144   | 144    | 48     | 128  | 48      | 192    | 96    | 0        | 192      | 624   | 96     | 20   | 0      | 0      | 480  | 12     |       | 28     | 48      | 104       | 54        | 288    | 384    | 96    | 128    | 314                       |
| Müller    | 144      | 144   | 96     | 16     | 592  | 80      | 144    | 360   | 352      | 392      | 2672  | 768    | 108  | 176    | 288    | 480  | 12     | 28    |        | 152     | 252       | 18        | 300    | 160    | 48    | 240    | 902                       |
| Schmidt   | 256      | 216   | 104    | 0      | 576  | 136     | 128    | 416   | 224      | 432      | 1024  | 384    | 32   | 160    | 224    | 800  | 24     | 48    | 152    |         | 168       | 0         | 432    | 608    | 16    | 320    | 838                       |
| Schneider | 352      | 224   | 136    | 16     | 288  | 76      | 240    | 224   | 56       | 448      | 1520  | 1280   | 416  | 32     | 120    | 148  | 4      | 104   | 252    | 168     |           | 18        | 464    | 960    | 224   | 352    | 714                       |
| Schreiber | 0        | 0     | 72     | 0      | 0    | 0       | 48     | 18    | 0        | 36       | 0     | 144    | 63   | 0      | 0      | 18   | 0      | 54    | 18     | 0       | 18        |           | 0      | 36     | 18    | 0      | 67                        |
| Schulz    | 128      | 0     | 84     | 8      | 512  | 416     | 192    | 360   | 68       | 356      | 2752  | 768    | 104  | 84     | 120    | 432  | 0      | 288   | 300    | 432     | 464       | 0         | 512    | 56     | 224   | 911    |                           |
| Seidel    | 256      | 256   | 384    | 32     | 160  | 288     | 256    | 176   | 0        | 176      | 368   | 64     | 256  | 96     | 144    | 72   | 32     | 384   | 160    | 608     | 960       | 36        | 512    |        | 160   | 128    | 565                       |
| Weber     | 32       | 28    | 24     | 4      | 64   | 64      | 32     | 48    | 16       | 48       | 80    | 0      | 0    | 8      | 16     | 128  | 16     | 96    | 48     | 16      | 224       | 18        | 56     | 160    |       | 32     | 138                       |
| Winter    | 24       | 112   | 32     | 0      | 24   | 192     | 24     | 128   | 0        | 128      | 512   | 0      | 16   | 32     | 96     | 208  | 0      | 128   | 240    | 320     | 352       | 0         | 224    | 128    | 32    |        | 198                       |

Abbildung 5-19 Alignment-Matrix im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

### Graph-Ansichten

Analog zur Alignment-Matrix lassen sich die Analysedaten auch in unterschiedlichen Graph-Ansichten visualisieren. Dies ist dann von Vorteil, wenn man zum Beispiel zusätzlich zu den Abstimmungsbedarfen zwischen Organisationseinheiten auch die organisatorischen Zugehörigkeiten oder andere Elemente und Relationen des Projektsystems auf einen Blick sehen möchte. In Abbildung 5-20 sind zwei Ansichten beispielhaft aufgeführt. Darin sind die Knotendurchmesser und die Kantendicke relativ zur Anzahl der Abstimmungsbedarfe dargestellt. Im linken Schaubild sind zusätzlich die Abteilungen enthalten und die Organisationseinheiten entsprechend ihrer Zugehörigkeit angeordnet. Die Positionierung der Entwicklungsaktivitäten im rechten Schaubild orientiert sich einerseits an ihrer Zugehörigkeit zu einer der drei Pro-

zessgruppen für die Entwicklung des Grundkörpers, des Antriebs und des Arms. Andererseits sind auch die Präzedenz-Beziehungen zwischen den Aktivitäten innerhalb einer Phase enthalten, durch die sie in einer logischen Reihenfolge von links nach rechts angeordnet sind. Im rechten Schaubild sind die Abstimmungsbedarfs-Kanten zusätzlich anhand des Distanz-Werts der entsprechenden Prozesselemente eingefärbt, wobei das Farbspektrum von grün für den niedrigsten Distanz-Wert bis rot für den höchsten Distanz-Wert reicht.

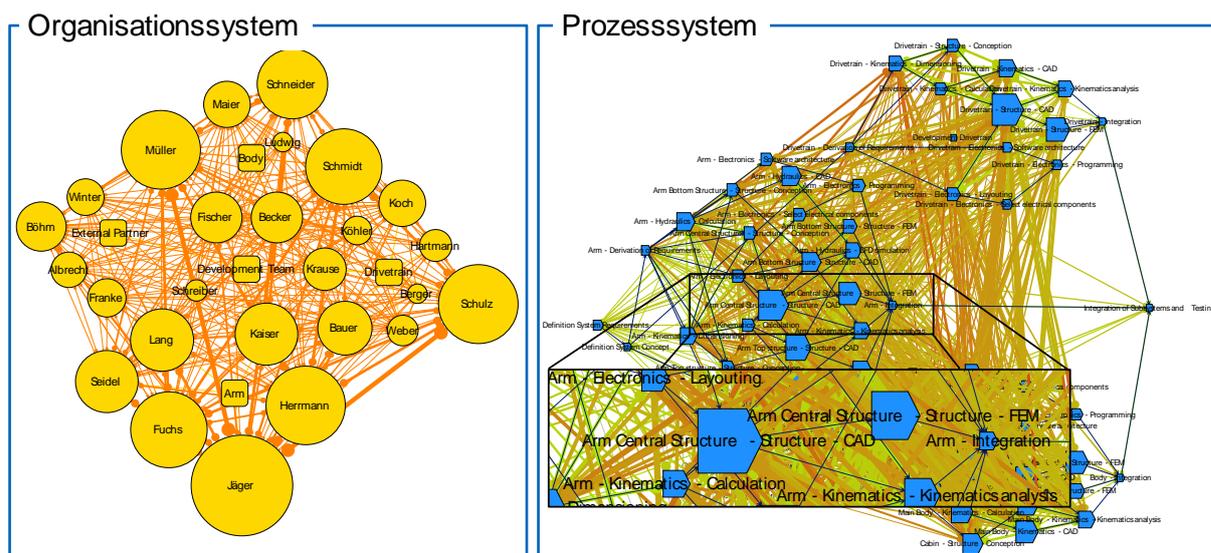


Abbildung 5-20 Beispiele für unterschiedliche Graph-Ansichten im Beispiel LEGO Bagger.

Die zwei Beispiele verdeutlichen, wie flexibel Graph-Ansichten gestaltet werden können und wie darin diverse Informationen anhand der Anordnung der Elemente, der Dimensionierung der Knoten und Kanten sowie anhand der Farbgebung qualitativ und auf einem Blick dargestellt werden können (siehe auch Kapitel 5.5.3). Sofern es die Lesbarkeit erlaubt, können Informationen außerdem mittels Beschriftungen dargestellt werden.

### Detaillierte Analysen

Ergänzend zum groben Überblick über Abstimmungsbedarfe können die Analyseergebnisse detaillierter betrachtet werden, um spezifische Abstimmungsbedarfe zu identifizieren, die gesonderte Aufmerksamkeit verdienen. Durch Auflistung der Abstimmungsbedarfe und Sortierung nach der jeweiligen gemittelten Kritikalität und Distanz können die relevantesten Abstimmungsbedarfe betrachtet werden. Tabelle 5-6 zeigt beispielhaft die TOP 5 Abstimmungsbedarfe im Beispiel LEGO Bagger. Darin sind zur Übersicht Bedarfe zusammengefasst, die von unterschiedlichen analytischen Produktrelationen (vgl. Ursache/Potential) stammen. Aufgrund der relativ hohen Kritikalität des Grundkörpers ist die Person **Müller**, die an der Konzeption bzw. Konstruktion des Grundkörpers beteiligt ist, von jedem der TOP 5 Abstimmungsbedarfe betroffen.

Tabelle 5-6 TOP 5 Abstimmungsbedarfe im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

|   | A  | B  | Ursache/<br>Potential                                       | Gemittelte<br>Kritikalität                | Distanz |   |
|---|--|--|---|---|---------|---|
| 1 | Organisationseinheit<br>Prozesselement<br>Produktelement | Müller<br>Konzeption<br>Grundkörper<br>#17 Grundkörper | Jäger<br>FEM zentrale<br>Struktur Arm<br>#8 Struktur Arm 1  | Geometrisch<br>Funktional<br>Kommunalität | 58      | 4 |
| 2 | Organisationseinheit<br>Prozesselement<br>Produktelement | Müller<br>CAD<br>Grundkörper<br>#17 Grundkörper        | Böhm<br>Entwicklung<br>(extern)<br>#14 Greifer              | Kommunalität                              | 45      | 4 |
| 3 | Organisationseinheit<br>Prozesselement<br>Produktelement | Müller<br>Konzeption<br>Grundkörper<br>#17 Grundkörper | Jäger<br>FEM zentrale<br>Struktur Arm<br>#11 Struktur Arm 2 | Funktional<br>Kommunalität                | 45      | 4 |
| 4 | Organisationseinheit<br>Prozesselement<br>Produktelement | Müller<br>Konzeption<br>Grundkörper<br>#17 Grundkörper | Jäger<br>FEM zentrale<br>Struktur Arm<br>#11 Struktur Arm 3 | Funktional<br>Kommunalität                | 45      | 4 |
| 5 | Organisationseinheit<br>Prozesselement<br>Produktelement | Müller<br>Konzept<br>Grundkörper<br>#17 Grundkörper    | Krause<br>Kinematikanalyse<br>Antrieb<br>#23 Kettentrieb    | Geometrisch                               | 45      | 4 |

Detaillierte Betrachtungen der Analysedaten sind außerdem aus lokaler Perspektive wertvoll. Wenn sich zum Beispiel eine Person einen Überblick über ihre individuellen Koordinationspartner verschaffen möchte, eignet sich die Darstellung der Daten in Form eines personenzentrierten Koordinationsnetzes. In Abbildung 5-21 ist das personenzentrierte Koordinationsnetz der Person Winter gezeigt, bei der es sich um ein Mitglied des externen Entwicklungspartners handelt und die für die Hydraulik des Greifers zuständig ist. Der Durchmesser der Knoten und die Dicke der Kanten in der Graph-Ansicht sind auch hier relativ zur absoluten Anzahl Abstimmungsbedarfe dargestellt. Insgesamt betreffen Winter 198 potentielle Abstimmungsbedarfe und davon nur 18 mit den direkten Kolleginnen und Kollegen Albrecht, Böhm und Franke. Die meisten Abstimmungsbedarfe bestehen mit Jäger und Schneider.

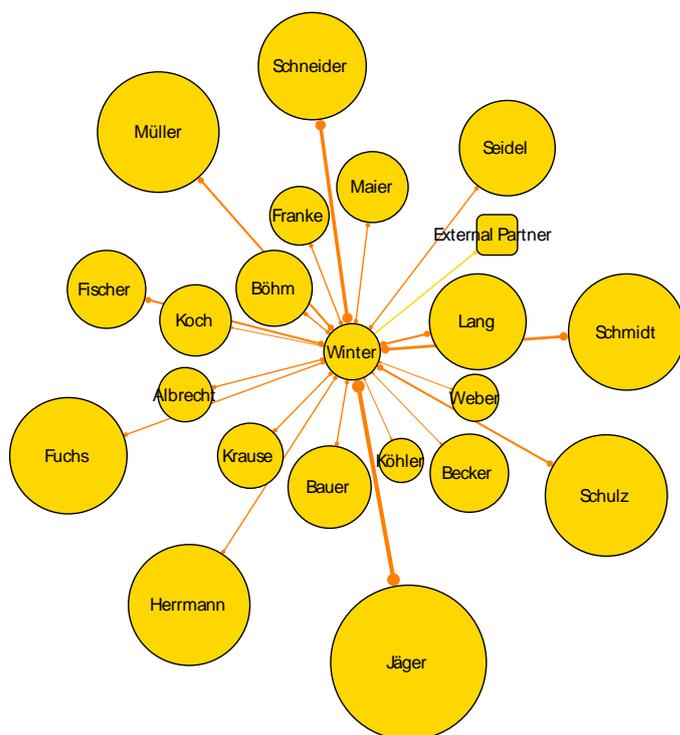


Abbildung 5-21 Personen-zentriertes Koordinationsnetz der Person „Winter“ im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

Ergänzend zur qualitativen Darstellung der Abstimmungsbedarfe für eine Person ist es möglich eine Auflistung der einzelnen Abstimmungsbedarfe für diese Person zu erstellen. Damit kann sie sich einen individuellen Überblick über für sie relevante Abstimmungsbedarfe verschaffen. Zusätzlich ist es denkbar, dass die betroffenen Personen die Analyseergebnisse so auf lokaler Perspektive auf Plausibilität überprüfen und überflüssige Bedarfe streichen. Auf diese Weise kann die Datengrundlage für die Ableitung von Koordinationsmaßnahmen auf globaler Ebene stark aufgewertet werden.

Tabelle 5-7 Beispielhafter Auszug einer Auflistung der Abstimmungsbedarfe von der Person „Winter“ im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

| Koordinations-partner | Distanz | Ursache/Potential                            | Produktelement              | Gemittelte Kritikalität |
|-----------------------|---------|--|-----------------------------|-------------------------|
| Müller, Schmidt       | 4       | Kommunalität                                 | #17 Grundkörper             | 41                      |
| Jäger                 | 4       | Kommunalität, Gemeinsame Mutter              | #8 Struktur Arm 1           | 18                      |
| Fuchs                 | 4       | Gemeinsame Mutter                            | #11 Struktur Arm 2          | 5                       |
|                       |         | Gemeinsame Mutter                            | #13 Struktur Arm 3          | 5                       |
| Krause                | 4       | Analytisch Indirekt 2                        | #23 Kettentrieb             | 5                       |
| Böhm                  | 2       | Geometrisch, Kommunalität, Gemeinsame Mutter | #14 Struktur Greifer        | 5                       |
| Bauer                 | 4       | Kommunalität                                 | #26 Struktur Antrieb rechts | 2                       |
| ...                   | ...     | ...  | ...                         | ...                     |

## Definition von Koordinationsmaßnahmen

Die berechneten Strukturmerkmale und die übersichtliche Darstellung der Informationen dienen als Grundlage für Entscheidungen zur gezielten Planung von Koordinationsmaßnahmen. Es kann jedoch kein „Kochrezept“ für die Auswahl geeigneter Koordinationsmaßnahmen bezüglich bestimmter Abhängigkeitsarten angewendet werden. Eine grobe Orientierung können aber zumindest die Betrachtungen von Oosterman [2001, S. 74-78] geben. Für direkte Abhängigkeiten aufgrund **kybernetischer Flüsse** beschreibt er die Definition **gemeinsamer Ziele bzw. Anforderungen** bezüglich der Schnittstelle als grundsätzlich geeignete Maßnahme. Sofern die Anforderungen erfüllt werden können, ist dann keine weitere Abstimmung mehr notwendig. Im Fall eines Abstimmungsbedarfs aufgrund einer **geometrischen Abhängigkeit** oder **Gemeinsamkeit** (z. B. gemeinsame Erfüllung einer Funktion) argumentiert er, dass eine **enge und iterative Abstimmung** notwendig ist. Es muss also für regelmäßigen Informationsaustausch gesorgt werden.

Hellenbrand [2013, S. 153-156] schlägt vor, die Kommunikationsflüsse der an der Entwicklung beteiligten Personen direkt an den entsprechend abgeleiteten Zusammenhängen (hier Abstimmungsbedarfe) auszurichten. Der Abstimmungsbedarf, der aufgrund einer technologischen Abhängigkeit auf Produktebene zu erwarten ist, muss aber nicht zwangsläufig direkt zwischen den betroffenen Personen stattfinden, sondern kann auch über andere Koordinationsmechanismen erfolgen.

Die Definition von konkreten Koordinationsmaßnahmen muss schlussendlich im spezifischen Anwendungsfall individuell erfolgen. Zusätzlich zur systematischen Betrachtung der Abstimmungsbedarfe hilft dabei die zusammengestellte Übersicht unterschiedlicher Koordinationsmechanismen in den Kapiteln 3.2.2 und 3.2.3.

## 5.4 Diskussion des Ansatzes

Der Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung zielt darauf ab, eine Übersicht über Abstimmungsbedarfe zu verschaffen, dadurch die gezielte Planung von Koordinationsmaßnahmen zu unterstützen und schließlich das Risiko für unzureichende oder fehlende Abstimmung im Entwicklungsprozess zu reduzieren. Der Ansatz **systematisiert die Identifikation von Abstimmungsbedarfen** und stellt Analyseergebnisse als Entscheidungsgrundlage für die **Ableitung von Koordinationsmaßnahmen** anschaulich dar.

Durch die Nutzung vorhandener Daten zur Erzeugung von Strukturmodellen und durch die Repräsentation dieser Strukturmodelle in einem integrierten Projektsystemgraphen ist es möglich, die Modellierung zu großen Teilen zu **automatisieren**. Einmal definierte Regeln zur Erzeugung der Graphen aus vorhandenen Daten und zur Ableitung und Bewertung von Abstimmungsbedarfen können wiederverwendet werden. Dadurch kann der Projektsystemgraph samt identifizierter Abstimmungsbedarfe nach Veränderung der Datengrundlage **auf Knopfdruck aktualisiert** werden. Basierend auf strukturellen Merkmalen werden die abgeleiteten **Abstimmungsbedarfe** hinsichtlich ihrer Relevanz **priorisiert** und Elementpaare mit ungünstigem Alignment herausgestellt. Verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten der Analyseergebnisse unterstützen die Interpretation und die Definition von Koordinationsmaßnahmen.

Je komplexer sich die Zusammenhänge in einem Projekt darstellen, desto größer ist der erwartete Nutzen des Ansatzes, da es für Projektbeteiligte mit steigender Komplexität schwieriger wird den Überblick über notwendige Abstimmungsbedarfe zu behalten. Mit Hilfe des Ansatzes wird die Beurteilung und Durchführung notwendiger Abstimmung nicht mehr allein dem situativen Handeln der Entwicklerinnen und Entwickler überlassen. Die Analyseergebnisse können jedoch nur Hinweise geben und ersetzen nicht die Einschätzung einer Expertin bzw. eines Experten. Diese ist zur Überprüfung der Ergebnisse auf Plausibilität und zur Definition konkreter Maßnahmen unter Berücksichtigung situativer Kontextinformationen schlussendlich weiterhin notwendig.

Der Vorteil, die **Analysen basierend auf vorhandenen Daten** automatisiert durchführen zu können, ist gleichzeitig die Hauptlimitation des Ansatzes. Die vollumfängliche Anwendbarkeit ist von der vorliegenden Datengrundlage über das zu betrachtende Projektsystem (Produkt, Prozess, Organisation) abhängig. Zur vollautomatischen Ausführung müssen die Daten formalisiert in IT-Systemen des Unternehmens vorhanden sein. Die Daten aus unterschiedlichen IT-Systemen müssen zudem konsistent und generell valide sein. Daten, die veraltet oder schlichtweg falsch sind, verfälschen die Analyseergebnisse und sind aufgrund der großen Datenmenge schwer identifizierbar. Nicht formal repräsentierte, aber für die Analyse notwendige Daten müssen manuell modelliert werden. Letztendlich lassen der sichtbare Trend zu unternehmensweit eingesetzten PDM- bzw. PLM-Systemen und deren zunehmende Integration in die restliche IT-Systemlandschaft aber erwarten, dass eine verwendbare Datengrundlage zukünftig in vielen Unternehmen vorausgesetzt werden kann.

Die **modellierten Strukturen** werden im vorgestellten Ansatz vereinfachend als **statisch** angesehen, was für die Betrachtung des Produktsystems und des Organisationssystems durchaus legitim ist [Eppinger & Browning 2012, S. 11]. Das Prozesssystem stellt dagegen einen **temporalen Fluss** dar und besteht aus Elementen, die sich jeweils nur in bestimmten Zeiträumen in der Realität manifestieren [Eppinger & Browning 2012, S. 11]. Das könnte bedeuten, dass eine Kante zu einer Aktivität eigentlich nur in dem Zeitraum gültig ist, in dem die Aktivität tatsächlich ausgeführt wird. Zur strukturellen Betrachtung soll jedoch die gesamte Prozessstruktur so einfließen, wie sie zum Betrachtungszeitpunkt geplant ist. Der zeitliche Bezug könnte zusätzlich berücksichtigt werden, um beispielsweise temporäre Koordinationscluster (vgl. Kapitel 5.5.2) abzuleiten oder weitere Bedingungen zur Ableitung von Abstimmungsbedarfen zu definieren. Elezi *et al.* [2011] oder Parraguez *et al.* [2015] zeigen beispielsweise anhand von Fallstudien, wie sich Organisationscluster bzw. strukturelle Merkmale von Kommunikationsnetzen abhängig von der Entwicklungsphase unterscheiden können.

Der Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung sieht eine Strukturmodellierung des gesamten Projektsystems in einem integrierten Datengraphen vor. Eine derartige Modellierung komplexer Entwicklungsprojekte bietet eine wertvolle Grundlage für vielversprechende Erweiterungsmöglichkeiten, welche im folgenden Kapitel erläutert werden.

## 5.5 Erweiterungspotentiale

In Kapitel 3.3 wurden existierende Ansätze diskutiert, die mittels Strukturmodellierung gewisser Teilaspekte eines Projekts das Management komplexer Entwicklungsprojekte unterstützen (z. B. Hellenbrand [2013]; Kreimeyer & Lindemann [2011]; Lévárdy [2006]; Marle

& Vidal [2016]). Die Datenbasis des hier vorgestellten Ansatzes baut auf den Strukturdaten auf, die für die existierenden Ansätze verwendet werden. Folglich können diese Ansätze mit dem Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung kombiniert werden. Neben dem Nutzen der einzelnen Ansätze ist eine solche generelle Erweiterbarkeit ein zusätzliches Argument, das den Aufwand für die Erstellung und Pflege der Strukturmodelle rechtfertigt. In den folgenden Unterkapiteln werden ergänzende Erweiterungsideen diskutiert, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind. Sie stellen eine weiterführende Motivation dar, um das Potential einer strukturbasierten Betrachtung der Koordination in Projektsystemen zu verdeutlichen.

### 5.5.1 Erweiterung der Datengrundlage

Die Aussagekraft und Interpretationsmöglichkeiten der Analyseergebnisse können gesteigert werden, wenn die Datengrundlage durch weitere Daten ergänzt wird. Nachfolgend werden konkrete Ergänzungsmöglichkeiten aufgelistet und deren Implikationen erläutert:

- Technisch-logische Abhängigkeiten führen nicht zwangsläufig zu Abstimmungsbedarf. In bestimmten Fällen ist keine Koordination mehr notwendig, weil die Abhängigkeit schon anderweitig adressiert wurde. Wenn in der Datengrundlage zumindest für direkte Produktabhängigkeiten die **Statusinformation** hinterlegt wäre, ob eine Abhängigkeit bereits adressiert wurde, könnte diese Information bei der Ableitung der Abstimmungsbedarfe berücksichtigt werden.
- Die Distanz zweier Organisationseinheiten wird derzeit über die Anzahl der Kanten berechnet, die den kürzesten Pfad zwischen diesen bilden. Alternativ würde vor allem in größeren Personennetzwerken eine Modellierung von **Bekanntheitsbeziehungen** (Wer kennt wen und wie gut?) oder von etablierten **Informationsflüssen** (Wer kommuniziert mit wem und wie intensiv?) eine höherwertige Datengrundlage zur Berechnung eines Indikators für den Widerstand einer Koordination darstellen. Parraguez [2015] nutzt beispielsweise Informationsflüsse zur Modellierung der Organisationsstruktur.
- Für Elemente des Prozess- und Organisationssystems könnten **ergänzende Attribute** definiert werden, um Informationen wie Zeitpunkte bzw. Dauern, Arbeitsaufwände und Arbeitskapazitäten zu **speichern**. Sie sind für das Projektmanagement relevant und können zur anschaulichen Visualisierung der Analyseergebnisse (siehe Kapitel 5.5.3) hilfreich sein. Auch die Budgetierung der Arbeitsstunden von Personen auf einem Projekt insgesamt bzw. pro Prozessschritt könnte bei der Analyse verwendet werden (siehe Kapitel 5.5.2).
- Moser & Wood [2015, S. 200] fügen Prozesselementen (Aktivitäten) die Eigenschaft *Komplexität* hinzu. Sie argumentieren, dass die **Komplexität einer Aufgabe** mit dem Aufwand für mögliche Nacharbeit und für Koordination korreliert. Daten über die Komplexität der Prozesselemente im Projektsystem könnten damit eine weitere wertvolle Grundlage zur Bewertung der Wichtigkeit eines Abstimmungsbedarfs sein. Umso komplexer eine Aufgabe, desto wichtiger ist es damit einhergehende Abstimmungsbedarfe zu adressieren.

- Im Schritt Vorbereitung wird zur Modellierung des Prozesssystems derzeit vorgesehen, die in einem Unternehmen definierten Referenzmodelle als Datengrundlage zu verwenden. In der Literatur lassen sich **Ansätze für das Management von Entwicklungsprozessen** finden, die eine **gehaltvollere Datengrundlage** bereitstellen können. Beispielfhaft sei hier auf die Arbeiten von Bichlmaier [2000] und Roelofsen [2011] verwiesen.
- Der Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung fokussiert derzeit auf die drei Projekt-Teilsysteme Produktsystem, Prozesssystem und Organisationssystem. Eine zusätzliche Betrachtung des **Zielsystems** und des **Toolsystems** ermöglicht eine noch vollständigere Erfassung der Projektzusammenhänge. Falls bei der Modellierung des Produktsystems Anforderungen mitberücksichtigt werden, fließt bereits ein gewisser Teil des Zielsystems mit ein. Die Korrelation dieser Anforderungen mit den übergeordneten Projektzielen und Unternehmenszielen ermöglicht es auch projektübergreifende Zusammenhänge in die Analyse einzubeziehen (siehe Multiprojektmanagement bzw. Projektportfoliomanagement in Kapitel 5.5.4). Die Ressourcen des Toolsystems werden in der Regel auch projektübergreifend genutzt. Die Betrachtung der hieraus resultierenden Zusammenhänge führt zu Koordinationsbedarfen aufgrund rivaler Ressourcen, was in dieser Arbeit ausgeklammert wurde.
- Die Untersuchungen dieser Arbeit beschränken sich auf das zu entwickelnde Produkt und die damit einhergehende Entwicklungsarbeit. Zur Betrachtung des Produktsystems werden dabei nur Produktmodelle berücksichtigt, also beispielsweise Repräsentationen der Anforderungen an das Produkt, Funktionsmodelle und Baumodelle (Baugruppenstruktur, Komponenten). Der beobachtbare Trend zur Entwicklung und Bereitstellung von **Produkt-Service Systemen (PSS)** legt jedoch nahe, insbesondere die mit dem Produkt verknüpften Servicefunktionen bzw. -Prozesse zu integrieren. Weitere eng mit dem Produktmodell verknüpfte Modelle sind **Fabrikmodelle**. Unternehmen mit Eigenproduktionsanteil entwickeln gemeinsam mit einem Produkt auch einen Produktionsprozess, Werkzeuge oder sogar komplette Fabrikanlagen. Trotzdem werden innerhalb einer Fabrik in der Regel unterschiedliche Produktbestandteile, Produktvarianten oder unterschiedliche Produkte gefertigt, wodurch den zu entwickelnden Produkten bezüglich der Produzierbarkeit gewisse Randbedingungen gesetzt werden. Hieraus entsteht der klassische Koordinationsbedarf im Dialog zwischen Entwicklung und Produktion im Sinne der integrierten Produktentwicklung [Ehrlenspiel & Meerkamm 2013]. Durch die integrierte Betrachtung von Produkt- und Fabrikmodellen könnte der hier vorgestellte Ansatz also zusätzlich unterstützen.

### 5.5.2 Weitere Möglichkeiten zur strukturellen Analyse

Die im vorangegangenen Kapitel adressierten Erweiterungsmöglichkeiten der Datengrundlage ziehen generell auch weitere Möglichkeiten der Analyse dieser Daten mit sich. Die folgende Auflistung bezieht sich vorwiegend auf Erweiterungen der strukturellen Analyse, die in Kapitel 5.3.3 beschrieben wurde.

- Der beschriebene Ansatz fokussiert auf die Ableitung von Abstimmungsbedarf auf Basis technisch-logischer Abhängigkeiten. **Offensichtlicher Abstimmungsbedarf** besteht allerdings auch, wenn zwei Prozesselemente das gleiche Produktelement erzeugen bzw. bearbeiten oder wenn zwei Organisationseinheiten gemeinsam in einem Prozess involviert sind bzw. für ein Produktelement verantwortlich sind. Ein solcher Abstimmungsbedarf ist vor allem dann relevant, wenn die beiden Elemente nicht Teil einer gemeinsamen Gruppe (d. h. Prozessphase bzw. Team oder Abteilung) sind.
- Zuvor wurde bereits beschrieben, dass die Berechnung des Widerstands für einen Abstimmungsbedarf zwischen zwei Organisationseinheiten durch Nutzung von Zusatzinformationen wie den Bekanntheitsgrad oder Informationsflüssen aufgewertet werden könnte. Ein weiterer Indikator für den Widerstand eines Abstimmungsbedarfs könnte die **Erreichbarkeit** der beteiligten Personen sein. Diese Erreichbarkeit ließe sich über die Anzahl der Stunden berechnen, die eine Person in einem Projekt involviert ist (vorausgesetzt diese Information ist verfügbar). Es kann nämlich davon ausgegangen werden, dass die Abstimmung mit einer Person im Projekt leichter fällt, wenn diese insgesamt stark in das Projekt involviert ist. Sie fiel dagegen schwerer, wenn die Person nur wenig mit dem Projekt zu tun hat.
- Zur Untersuchung sozialer Netzwerke gibt es eine weitere Kennzahl namens *Cognitive Load* [Carley *et al.* 2013, S. 847-850], die ein vielversprechender Indikator für den Widerstand der Koordination in Bezug auf eine Person darstellen könnte. Vereinfachend könnte sie als Anzahl der Prozesselemente berechnet werden, in die eine Person involviert ist. Es ist davon auszugehen, dass eine Person mit hohem Cognitive Load gefährdet ist, den Überblick zu verlieren und folglich Abstimmungsbedarfe vernachlässigt.
- Bei der Ableitung von Abstimmungsbedarfen werden im Projektsystemgraphen Abstimmungsbedarfs-Kanten zwischen Prozesselementen und zwischen Organisationseinheiten erzeugt. Die Analyse der daraus resultierenden Projektstruktur könnte weitere interessante Einblicke liefern. Zum Beispiel könnte die **Kritikalität** von Prozesselementen oder Organisationseinheiten **mit Bezug auf** zugeordnete **Abstimmungsbedarfe** Aufschluss darüber geben, wie wichtig das jeweilige Element für den Projekterfolg ist. Zum Beispiel erzeugt eine in diesem Sinne kritische Person bei einem Ausfall wahrscheinlich eine große Lücke.
- Weiterhin können anhand der abgeleiteten Abstimmungsbedarfe **Koordinationscluster** identifiziert werden. Daraus lassen sich beispielsweise neue Teamstrukturen oder sinnvolle Koordinatoren-Rollen ableiten. Hier würde es eine zusätzliche Berücksichtigung des zeitlichen Bezugs im Entwicklungsprozess auch ermöglichen, die Organisationsstruktur je nach Zeitpunkt im Projekt in Bezug auf die notwendige Abstimmung zu optimieren.
- Schließlich existieren weitere Strukturkennzahlen, die die Interpretation der Analyseergebnisse aufwerten können. Gleichzeitig sind diese jedoch aufwändiger zu interpretieren, weil ihre Aussagekraft stark von den zugrundeliegenden Knoten- und Kantentypen abhängt. Beispielhaft seien hier die prominentesten Kennzahlen wie die *Eigenvektor Cent-*

*rality*, *Betweenness Centrality*, *Closeness Centrality* oder *Node Information Centrality* genannt (vgl. Marle & Vidal [2016, S. 183]; Parraguez [2015, S. 39]).

### 5.5.3 Weitere Visualisierungsmöglichkeiten der Ergebnisse

Die beschriebene Visualisierung der Analyseergebnisse als Teil des Ansatzes fokussiert auf die Darstellung der relevanten Informationen bezüglich der identifizierten Abstimmungsbedarfe. Letztendlich bildet der entstandene Projektsystemgraph jedoch einen umfassenden Datensatz, aus dem mittels weiterer Sichtweisen (Filterung bestimmter Daten, Darstellung der Informationen) wertvolle Erkenntnisse über das Projekt erzeugt werden können. Im Folgenden werden entsprechende Visualisierungsmöglichkeiten diskutiert, die insbesondere auf die Repräsentation der Daten als typisierter, attribuerter Graph aufbauen. Die graphenbasierte Repräsentation wird häufig als intuitive Darstellungsform bezeichnet [Helms & Kissel 2016, S. 982; Kreimeyer & Lindemann 2011] und wird deshalb als besonders geeignet gesehen.

- In sogenannten stärkebasierten Graphen richtet sich die relative Position der Knoten zueinander nach einem Attributwert der verbindenden Kanten. Diese Darstellungsform könnte sich eignen, um das Prozesssystem oder das Organisationssystem samt der Abstimmungsbedarfe darzustellen. Elemente, die durch viele Abstimmungsbedarfe miteinander verbunden sind, rücken dann automatisch enger zusammen und Koordinationscluster wären auf einem Blick erkennbar.
- Die Position der Knoten könnte sich auch nach ganz anderen Kriterien richten. Es ist zum Beispiel möglich die Position der Prozesselemente im Sinne eines zeitlichen Ablaufs zu bestimmen. Sofern die Daten bezüglich der Prozesslogik und der Prozessdauern verfügbar sind, könnte die Anordnung der Prozesselemente analog zur Netzplantechnik bzw. eines Gantt-Diagramms erfolgen.

### 5.5.4 Erweiterung des Anwendungskontexts

Der beschriebene Ansatz richtet sich primär an Projektmanagerinnen und Projektmanager zur Unterstützung der Koordinationsplanung in einem Entwicklungsprojekt zu Beginn der Detaillierungsphase. Es sind jedoch vielversprechende Erweiterungen des Anwendungskontexts denkbar:

- Die Betrachtung könnte von einem Projekt auf mehrere Projekte innerhalb eines Programms bzw. Projektportfolios erweitert werden. Bei der Koordinationsplanung können dann weitere Abhängigkeiten aufgrund von Plattformelementen bzw. standardisierten Modulen über mehrere Projekte hinweg berücksichtigt werden. Außerdem sind Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter häufig in mehreren Entwicklungsprojekten beteiligt, was dann bei der Koordinationsplanung mit einfließen kann.
- Eine vollautomatische Erzeugung und Analyse eines integrierten Projektgraphen aus vorhandenen Datengrundlagen würde es ermöglichen, die Betrachtungen regelmäßig durchzuführen. So können strukturelle Veränderungen während der allmählichen Detaillierung zeitnah berücksichtigt werden. Dies ermöglicht auch eine Anwendung des Ansatzes im

Kontext einer agilen Entwicklung, für die vor jedem „Sprint“ die relevanten Abstimmungsbedarfe identifiziert werden könnten.

- Generell ermöglicht eine kontinuierliche Pflege der Daten Erkenntnisse in Echtzeit. Das bezieht sich nicht nur auf allmähliche Veränderungen der nativen Daten, sondern auch auf die Analyse möglicher Auswirkungen struktureller Anpassungen des Projektsystems. Auf diese Weise könnte die Projektstruktur im Sinne eines *Project Engineering* gezielt gestaltet und in Bezug auf bestimmte Größen wie zum Beispiel Koordinationsaufwände hin optimiert werden.
- Ergänzend könnte der Ansatz auch für voraussagende Analysen genutzt werden. Mit Hilfe von vorhandenen Ansätzen zur Simulation von Entwicklungsprojekten (z. B. Moser & Wood [2015]) könnte eine Prognose über Projektlaufzeiten und Projektkosten abgeleitet werden. Somit könnte der zu erwartende Effekt durch die Einführung von Koordinationsmaßnahmen für das Gesamtprojekt abgeschätzt werden.

## 6. Evaluation

Das Vorgehen zur strukturbasierten Koordinationsplanung wurde anhand von zwei Fallstudien initial evaluiert. In diesem Kapitel wird zunächst das Evaluationsdesign erläutert, bevor die Ergebnisse der beispielhaften Anwendung des Ansatzes in den zwei Fallstudien aufgezeigt werden. Anschließend werden die Ergebnisse aus einer Fragebogenstudie ausgewertet und schließlich eine kritische Reflexion durchgeführt sowie ein Gesamtfazit gezogen.

### 6.1 Evaluationsdesign

Blessing & Chakrabarti [2009, S. 184] unterscheiden generell zwischen einer Unterstützungsevaluation, Anwendungsevaluation und Erfolgsevaluation. Die **Bewertung der Unterstützung** des entwickelten Ansatzes erfolgt anhand des illustrativen Beispiels LEGO Bagger und wurde **in Kapitel 5.4 diskutiert**. Das **illustrative Beispiel zeigt** bereits eine **grundsätzliche Anwendbarkeit** des Ansatzes. Zwei weitere Fallstudien ermöglichen es, die Anwendbarkeit im Kontext realer Entwicklungsprojekte zu untersuchen. Im Rahmen der Fallstudien wird außerdem anhand eines Fragebogens und eines Workshops zur Diskussion der Ergebnisse auf eine Bewertung des Nutzens des Ansatzes abgezielt (Erfolgsevaluation). Abbildung 6-1 gibt einen Überblick über das Evaluationsdesign.

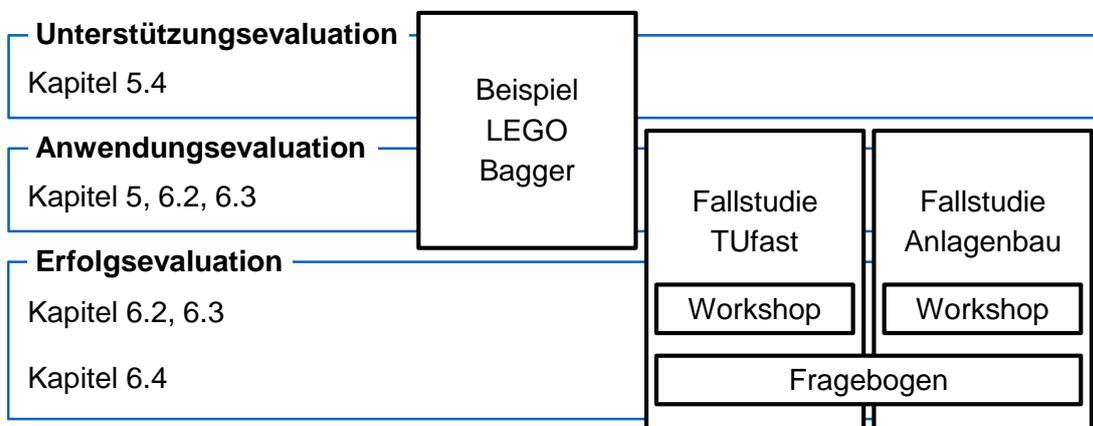


Abbildung 6-1 Überblick über das Evaluationsdesign.

#### 6.1.1 Entwicklung eines Software-Prototypen zur Anwendungsevaluation

Um die Idee einer datengetriebenen und automatisierbaren, strukturbasierten Koordinationsplanung zu realisieren und zu konkretisieren, war es notwendig einen Software-Prototyp als Demonstrator zu entwickeln. Zur Erstellung des Software-Prototyps wurde Soley Studio<sup>37</sup> verwendet, weil das Programm mehrere wesentliche, für den Ansatz notwendige Funktionalitäten vereint:

<sup>37</sup> Siehe <https://www.soley.io/de>, zuletzt aufgerufen am 08.11.2016

- **Definition eigener Metamodelle:** Es ist möglich eigene Metamodelle zur Modellierung von Daten in einem Graphen zu definieren. Es können beliebig viele Knotenklassen, Kantenklassen und Attribute unter Verwendung des Vererbungsprinzips definiert werden.
- **Definition von Regeln:** Es können Algorithmen und Regeln zur Graphentransformation programmiert und auf einen Datengraph ausgeführt werden.
- **Datenimport:** Der Import von Daten aus verschiedenen Quellen in einen Datengraph wird unterstützt. Der Import kann außerdem mit Hilfe von Regeln für spezifische Anwendungsfälle automatisiert werden.
- **Visualisierung der Daten:** Die Darstellung von Datengraphen in graphenbasierten oder matrixbasierten Repräsentationen wird unterstützt. Die visuelle Darstellung der Knoten- und Kanteninstanzen kann auf Basis des Metamodells und unter Verwendung jeweiliger Attribute individuell definiert werden. Außerdem stehen weitere Funktionalitäten bei der Betrachtung eines Datengraphen zur Verfügung, wie zum Beispiel die Anordnung der Knoten nach unterschiedlichen Layouts. In der Visualisierungsumgebung ist es zudem möglich selbst zu modellieren und somit einen Datengraphen manuell zu erstellen bzw. zu bearbeiten.

Im entwickelten Software-Prototyp ist das in Kapitel 5.2 vorgestellte Basis-Metamodell implementiert, das die Grundlage zur Modellierung von Projektdaten darstellt. Darüber hinaus sind darin Regeln und Algorithmen programmiert, die die in Kapitel 5.3 beschriebenen Graphentransformationen und Berechnungen zur Analyse automatisiert ausführen. So können aus vorhandenen Projektdaten auf Knopfdruck analytische Produktrelationen bzw. Abstimmungsbedarfe abgeleitet und strukturelle Merkmale berechnet werden.

Es wird zur Begrenzung des Umfangs dieser Arbeit davon abgesehen, die konkrete Implementierung des Software-Prototypen darzulegen. Er ist als Demonstrator letztendlich nur als Mittel zum Zweck zu sehen, um den Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung mit konkreten Daten durchführen zu können. Die erzeugten Ergebnisse basieren schließlich auf der konzeptionellen Grundlage des Ansatzes (Ableitung von Abstimmungsbedarfen nach bestimmten Mustern; Berechnung struktureller Merkmale) und sind unabhängig von der programmtechnischen Implementierung.

### 6.1.2 Workshop und Fragebogen zur Erfolgsevaluation

Neben der grundsätzlichen Anwendbarkeit soll im Rahmen von zwei Fallstudien auch der Nutzen des Ansatzes untersucht werden. Dies erfolgt zweigeteilt in Form eines Workshops und mittels eines Fragebogens. Im Workshop werden einzelnen Personen, die am untersuchten Entwicklungsprojekt beteiligt sind, die Analyseergebnisse präsentiert und gemeinsam mit ihnen diskutiert. Die Plausibilität der Ergebnisse aus Sicht der Teilnehmer ist hier ein wichtiger Indikator für die Anwendbarkeit des Ansatzes. Die entsprechenden Rückmeldungen der Teilnehmer werden gemeinsam mit den Analyseergebnissen in den Kapiteln 6.2.4 und 6.3.4 beschrieben.

Ein Fragebogen für die Workshop-Teilnehmer zielt ergänzend auf die strukturierte Erhebung des erwarteten Nutzens des Ansatzes ab. Zusammengefasst werden darin folgende Aspekte adressiert (der vollständige Fragebogen ist in Anhang 9.5 einsehbar):

- Generelle Wichtigkeit des Themas Koordination
- Eignung der im Ansatz vorgeschlagenen Indikatoren Kritikalität, Distanz und Nähe zur Bewertung von Abstimmungsbedarfen
- Aussagekraft und Nutzen der Auflistung der Abstimmungsbedarfe, der Alignment-Matrix und von personenzentrierten Koordinationsnetzen
- Insgesamt erwarteter Nutzen und Mehrwert des Ansatzes

Zusätzlich sind Kommentarfelder für die Angabe alternativer Indikatoren zur Bewertung der Relevanz eines Abstimmungsbedarfs und für ergänzende Kommentare bzw. Anregungen vorhanden. Die Ergebnisse dieser Fragebogenstudie werden zusammengefasst in Kapitel 6.4 diskutiert.

## 6.2 Fallstudie TUfast

Die Fallstudie TUfast beschäftigt sich mit einem Entwicklungsprojekt des studentischen Vereins TUfast e. V. an der Technischen Universität München (TUM). Das sogenannte TUfast Eco-Team<sup>38</sup> nimmt jährlich erfolgreich an internationalen Wettbewerben wie zum Beispiel dem Shell Eco-marathon teil, in denen es um die Entwicklung energieeffizienter Prototypenfahrzeuge geht. Das TUfast Eco-Team hat sich in dem betrachteten Entwicklungsprojekt zum Ziel gesetzt, in der Rennsaison 2017 zum ersten Mal mit einem Fahrzeug in der Urban Concept-Klasse an den Start zu gehen. In dieser Klasse wird neben hoher Energieeffizienz auch eine eingeschränkte Straßenverkehrstauglichkeit gefordert.

Die Durchführung der Fallstudie wurde durch ein Studienarbeitsprojekt (PE-Vollmann 2016) unterstützt. Der ausarbeitende Student war während der Fallstudie als stellvertretender Teamleiter selbst Teil des Entwicklungsteams und hatte dadurch guten Zugang zu Daten und anderen Teammitgliedern. Das Studienarbeitsprojekt erstreckte sich über den Zeitraum von Mai bis Oktober 2016, was einen Großteil der Konzeptphase und Konstruktionsphase des betrachteten Entwicklungsprojekts abdeckt (vgl. Abbildung 6-2).

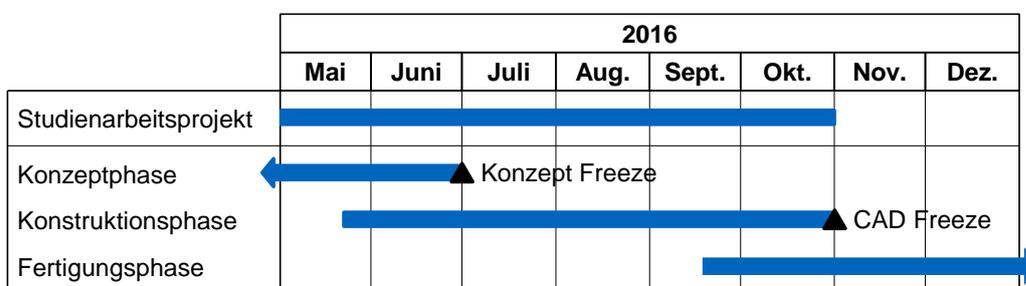


Abbildung 6-2 Laufzeit des Studienarbeitsprojekts und Zeitplanung der Entwicklungsphasen in der Fallstudie TUfast.

<sup>38</sup> <http://tufast-eco.de/de/>, zuletzt aufgerufen am 26.10.2016

Die Entwicklung eines Fahrzeugs für die Urban Concept-Klasse im TUfast Eco-Team wird aus folgenden Gründen als komplexes Entwicklungsprojekt angesehen:

- Grundsätzlich kann das TUfast Eco-Team auf sechs Jahre Erfahrung in der Entwicklung hoch energieeffizienter Prototypenfahrzeuge aufbauen. Durch die Anforderungen an die Straßenverkehrstauglichkeit muss das Fahrzeugkonzept in der Urban Concept-Klasse jedoch umfassend überarbeitet werden. Der **hohe Neuheitsgrad** führt zu einer großen **Unsicherheit** im Entwicklungsprojekt.
- Das Team besteht aus Studierenden **unterschiedlicher Studienrichtungen**, wie z. B. Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik und Betriebswirtschaftslehre. Ein Großteil befindet sich am Anfang des Studiums und bringt **geringe Vorkenntnisse** mit.
- Außerdem herrscht generell eine starke **Fluktuation** im TUfast Eco-Team. Die Studierenden arbeiten in der Regel nur ein bis zwei Jahre mit. Insofern haben die Teammitglieder insgesamt **wenig Entwicklungserfahrung**. Mitglieder, die im ersten Jahr erste Projekterfahrungen gesammelt und die notwendigen technischen Fertigkeiten (z. B. CAD-Konstruktion) erlernt haben, übernehmen im zweiten Jahr normalerweise leitende Aufgaben und geben ihr Wissen an neue Teammitglieder weiter.
- Nachdem sich die Studierenden neben ihrem Studium in dem Projekt engagieren, muss die gesamte Entwicklungsarbeit auf viele Schultern verteilt werden. Die **hohe Arbeitsteiligkeit** führt zu viel Abstimmungsbedarf.
- Eine intensive **Abstimmung** zwischen Teammitgliedern ist dabei grundsätzlich durch mehrere Faktoren **erschwert**:
  - **Flexible Arbeitszeiten**: Die Arbeitszeiten einzelner Teammitglieder richten sich primär nach dem Uni-Alltag, weshalb nicht alle gleichzeitig arbeiten. Auch die Prüfungszeiten der Mitglieder überschneiden sich nicht vollständig, weshalb der mögliche Arbeitseinsatz der Studierenden über die Zeit unterschiedlich verteilt ist.
  - **Schwache Vernetzung**: Aufgrund der kurzfristigen und verteilten Zusammenarbeit kennen sich Teammitglieder gegenseitig häufig nur flüchtig. Dies kann zu Hemmnissen in der Abstimmung zwischen Teammitgliedern führen.
  - **„Verteilte Entwicklung“**: Viele Teammitglieder arbeiten von zu Hause aus oder an den unterschiedlichen Standorten der TUM in und um München. Sie laufen sich deshalb nicht zwangsläufig regelmäßig über den Weg.
  - **Variierender Arbeitseinsatz**: Neben den flexiblen Arbeitszeiten und der schwachen Vernetzung spielen der variierende Arbeitseinsatz (unterschiedlich hohes Commitment) und auch die Zuverlässigkeit der Teammitglieder eine wichtige Rolle in der Abstimmung.
- Schließlich handelt es sich bei dem zu entwickelnden Fahrzeug um ein **mechatronisches Produkt**, in dem neben allgemeiner Mechanik und Elektrik/Elektronik insbesondere Disziplinen wie Leichtbau, Fahrdynamik, Aerodynamik und Batteriesteuerung eine wichtige Rolle spielen.

Die erfolgreiche Koordination stellt in Entwicklungsprojekten bei TUfast eine Hauptherausforderung dar. Das zeigen Teilergebnisse einer Fragebogenstudie in einem weiteren, parallel laufenden Studienarbeitsprojekt (PE-Spath 2016) in Kooperation mit TUfast. In dem Fragebogen wurden 27 TUfast-Mitglieder unter anderem über die Vor- und Nachteile ihrer Teamstruktur und Baugruppengliederung befragt (die Teamstruktur entspricht genau der Baugruppengliederung, vgl. Kapitel 6.2.1). Die einzelnen Antworten sind im Anhang 9.5 einsehbar. Die Vorteile werden überwiegend in der Transparenz (klare Strukturen, klare Verantwortlichkeiten) und der guten Zusammenarbeit (effektive und effiziente Kommunikation) innerhalb einer Baugruppe gesehen. Gleichzeitig wird die mangelnde bzw. unzureichende Abstimmung bezüglich baugruppenübergreifender Zusammenhänge in über der Hälfte Antworten als wesentlicher Nachteil genannt. Einzelne Antworten weisen darauf hin, dass die Verantwortung für baugruppenübergreifende Schnittstellen unklar ist („Jeder braut sein eigenes Süppchen“).

Diese Ausgangssituation motiviert die Anwendung des Ansatzes zur strukturbasierten Koordinationsplanung in Kooperation mit dem TUfast Eco-Team. Im Folgenden werden die Teilschritte des Ansatzes beschrieben. Die Analyseergebnisse wurden sechs leitenden Teammitgliedern (Teamleiter Urban Concept, Technischer Leiter Urban Concept, vier Package-Leiter) präsentiert und mit ihnen diskutiert (Schritt 4).

### 6.2.1 Schritt 1: Vorbereitung

Zu Beginn der Fallstudie TUfast standen nur wenige Informationen über das Projektsystem zur Verfügung. Eine „Task Force“ beschäftigte sich gerade mit der Ausarbeitung eines Grobkonzepts, in dem grundlegende Fragen über den Antrieb und den Aufbau des Fahrzeugs definiert wurden. Es bestand ein grober Projektzeitplan (sh. Anhang 9.4) und das konkrete Entwicklungsteam musste erst noch akquiriert und zusammengestellt werden. Neben dem Projektzeitplan standen keine weiteren Modelle zur Verfügung, um daraus Daten für die strukturbasierte Koordinationsplanung zu verwenden. Folglich wurden die Modelle im Rahmen des Studienarbeitsprojekts erst im Laufe der Entwicklung erstellt.

#### **Produktsystem**

Das zentrale Produktmodell im Urban Concept Entwicklungsprojekt stellt die Baustruktur dar. Diese wird im Laufe der Konzeptentwicklung in einer Excel-Tabelle detailliert. Das Gesamtfahrzeug ist darin zunächst in die drei sogenannten Packages *Fahrwerk*, *Antrieb* und *Chassis* sowie in jeweilige Baugruppen aufgeteilt (Schaubild a in Abbildung 6-3). In einer weiteren Tabelle sind zwar die aus dem Wettbewerbs-Reglement abgeleiteten Anforderungen an das Fahrzeug dokumentiert, sie werden jedoch nicht auf ihre gegenseitigen Abhängigkeiten hin analysiert und den Komponenten nur auf Ebene der Packages zugeordnet. Da sich aus diesen Daten keine sinnvollen Abhängigkeiten im Produktsystem ableiten lassen, werden die Anforderungen für die Koordinationsplanung in dieser Fallstudie nicht weiter berücksichtigt.

Eine ausführliche Stückliste, in der die Baugruppen in Unterbaugruppen und diese in Bauteile eingeteilt sind, stand erst zu einem späten Zeitpunkt des Projekts (September 2016) zur Verfügung. Auf Basis dieser Auflistung wird anschließend in Anlehnung an das Vorgehen nach



- Karosserie konstruieren
- Antriebsteile konstruieren
- Platinenlayouts für Antrieb erstellen und Software schreiben
- Fahrwerksteile konstruieren
- Chassisteile konstruieren

Die Konstruktion der Karosserie wird vom initiiierenden Kernteam („Task force“) durchgeführt und startet mit großem Vorlauf bereits vor Beendigung der Konzeptphase, weil die Fertigung der Karosserie lange dauert und deshalb früh in Auftrag gegeben werden muss. Das eigentliche Entwicklerteam startet mit den restlichen Aufgaben erst nach dem Konzept Freeze und bearbeitet diese parallel bis zum CAD Freeze (vgl. Abbildung 6-2 und Projektplan im Anhang 9.4). Es stehen keine Informationen über die einhergehende Prozesslogik zur Verfügung.

### Organisationssystem

Die Organisationsstruktur des gesamten Teams ist zunächst funktional in die Bereiche **Organisation** und **Technik** eingeteilt, wobei sich der Technikbereich divisional nach den Packages **Fahrwerk**, **Antrieb** und **Chassis** in drei verschiedene Teams gliedert. Der sogenannte **Teamleiter** verantwortet den Bereich Organisation und übernimmt damit Projektmanagement-Aufgaben. Der **technische Leiter** ist für den gesamten Bereich Technik und damit für das Gesamtfahrzeug zuständig. Mitglieder, die Packages oder Baugruppen verantworten, werden **Baugruppenleiter** der jeweiligen Baugruppe genannt. Die restlichen Teammitglieder sind **Entwicklerinnen bzw. Entwickler** und sind einem der drei Package-Teams zugeordnet. Die Rollen- und Teamzuteilung wird bei TUfast in einer Excel-Tabelle dokumentiert, wobei für die weiteren Betrachtungen hier nur die Teamzuteilung ausschlaggebend ist. Der daraus resultierende Datengraph ist in Abbildung 6-4 abgebildet. Insgesamt sind 32 Personen am Entwicklungsprojekt beteiligt.

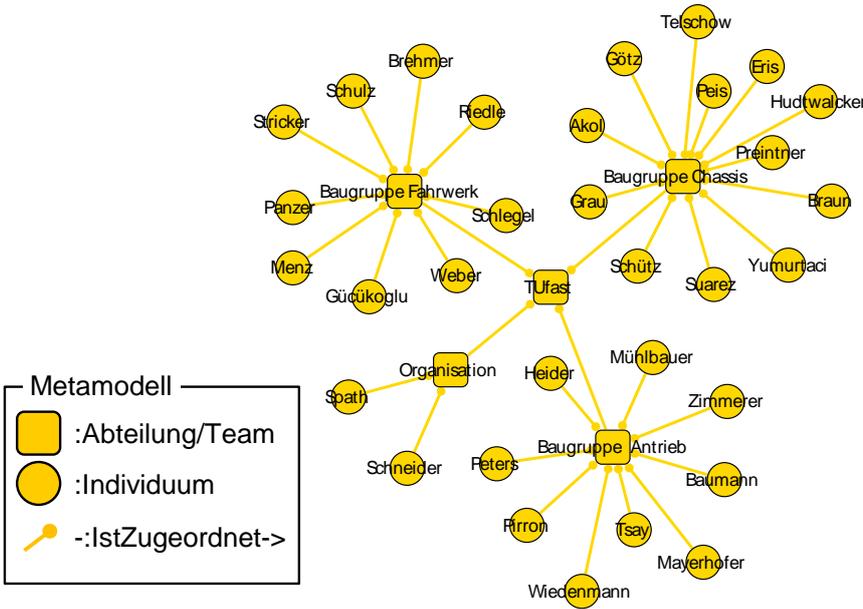


Abbildung 6-4 Metamodell (instanziierte Knoten- und Kantenklassen) und Datengraph des Organisationssystems in der Fallstudie TUfast.

### 6.2.2 Schritt 2: Integration

Bei TUfast folgt die Verknüpfung der Projekt-Teilsysteme der Logik, dass die einzelnen Teammitglieder für unterschiedliche Baugruppen oder Bauteile verantwortlich gezeichnet werden. Diese Zuteilung hat sich im Laufe der Entwicklung konkretisiert (die Teammitglieder mussten erst rekrutiert werden) und ist in Form einer Excel-Tabelle dokumentiert. Deshalb können die Zusammenhänge automatisiert in den Datengraphen des Projektsystems überführt werden (siehe Graphen-Schaubild in Abbildung 6-5). Jedes Bauteil bzw. jede Baugruppe ist genau einer Person zugeordnet, wobei Personen in der Regel mehrere Komponenten verantworten.

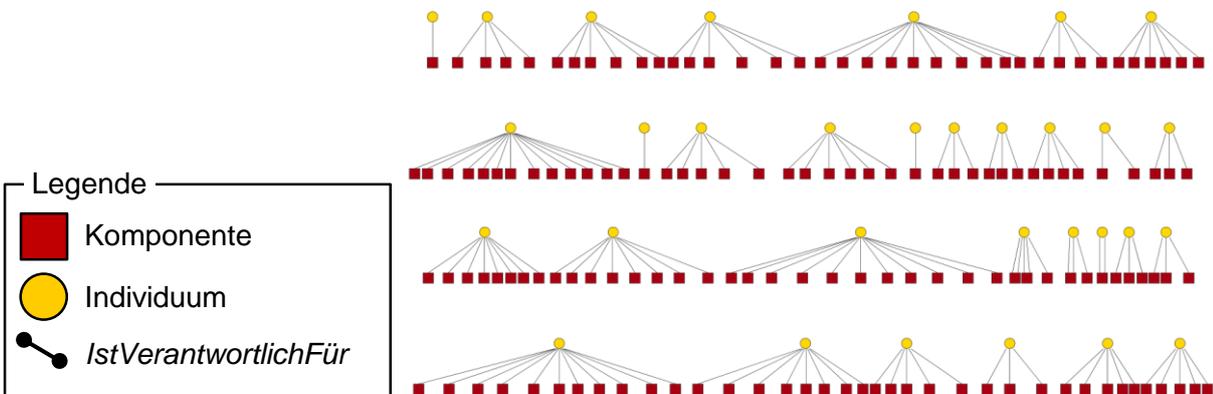


Abbildung 6-5 Graphen-Schaubild zur Veranschaulichung der Zuordnung von Individuen auf Komponenten in der Fallstudie TUfast.

Aus Prozesssicht lassen sich die fünf übergeordneten Arbeitspakete für die jeweiligen einzelnen Bauteile weiter aufteilen. Für jedes Bauteil kann eine Entwicklungsaktivität instanziiert werden, in deren Rahmen (je nach Bauteil) CAD-Modelle, Schaltpläne und/oder Programmcode erstellt werden. Für jede Baugruppe lässt sich außerdem eine Aktivität instanziiieren, die auf die Integration der enthaltenen Bauteile bzw. Unterbaugruppen abzielt. Da auf diese Weise für jede Komponente (Bauteil oder Baugruppe) genau eine korrespondierende Aktivität erzeugt wird und keine weiteren Daten über sonstige Verknüpfungen der Aktivitäten zur Verfügung stehen, stellt die Betrachtung des Prozesssystems in dieser Fallstudie keinen Informationsgewinn dar.

Der resultierende Datengraph für das Projektsystem beinhaltet folglich nur Produktelemente und Organisationseinheiten und besteht aus insgesamt 199 Knoten und 584 Kanten.

### 6.2.3 Schritt 3: Analyse

Auf Basis der Baustruktur und den angegebenen direkten Produktrelationen werden im Analyse-Workflow zunächst alle denkbaren technischen Abhängigkeiten im Produktsystem ermittelt. Insgesamt werden dabei 1906 technische Abhängigkeiten identifiziert. Für jede technische Abhängigkeit werden anschließend potentielle Abstimmungsbedarfe abgeleitet. In dieser Fallstudie ergibt sich für jede technische Abhängigkeit zwischen zwei Produktelementen, für die zwei unterschiedliche Personen verantwortlich sind, genau ein Abstimmungsbedarf zwischen den beiden Personen. Werden die beiden Produktelemente von einer Person verantwortet, wird kein Abstimmungsbedarf abgeleitet. Dadurch ergeben sich insgesamt 709 Abstimmungsbedarfe auf Organisationsebene. Die Ableitung von Abstimmungsbedarf auf Prozessebene ist in dieser Fallstudie überflüssig, da dadurch kein Informationsgewinn erzeugt wird. Die Analyseergebnisse werden im nachfolgenden Kapitel zusammengefasst und jeweils diskutiert.

### 6.2.4 Schritt 4: Interpretation – Feedback von TUfast

#### **Portfolio-Darstellung Produktsystem**

Die Betrachtung des Einflussportfolios ermöglicht einerseits eine erste Plausibilitätsprüfung der Daten und andererseits eine Einschätzung über kritische Produktelemente. In der Fallstudie TUfast stehen zur Erstellung des Einflussportfolios Komponenten und ihre Relationen zur Verfügung (Abbildung 6-6). Die Komponenten liegen im Portfolio alle auf der Diagonalen, weil die Zusammenhänge nicht weiter spezifiziert sind und deshalb als ungerichtete Kanten sowohl zur Passivsumme als auch zur Aktivsumme beitragen.

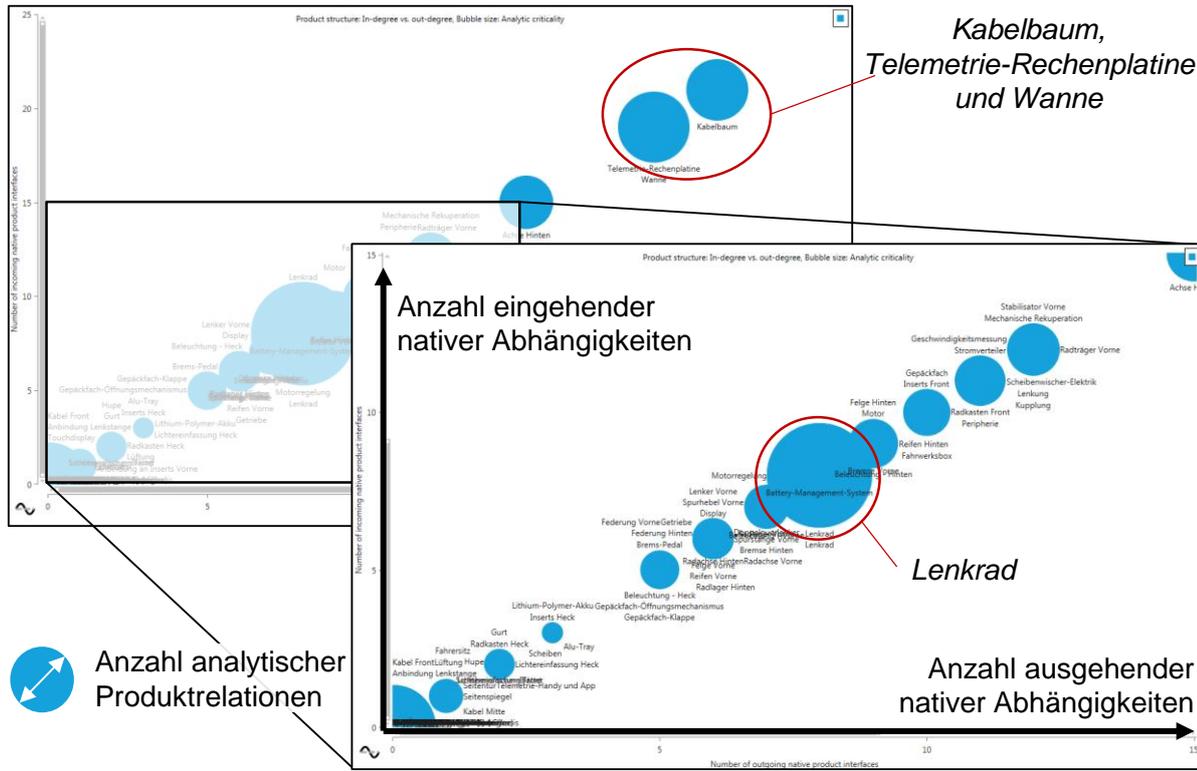


Abbildung 6-6 Einflussportfolio in der Fallstudie TUFast.

Als verhältnismäßig kritische Bauteile gelten der Kabelbaum, die Telemetrie-Rechenplatine und die Wanne. Die hohe Kritikalität des Kabelbaums lässt sich damit erklären, dass dieser viele Informationsschnittstellen hat. An sich wird der Kabelbaum von den leitenden Teammitgliedern jedoch als nicht so kritisch gesehen. Auffallend ist auch das Lenkrad, das zwar weniger direkte Relationen hat, für das aber durch seine Einbindung in die Produktstruktur am meisten technische Abhängigkeiten abgeleitet werden können. Dies ist für die TUfast-Entwickler zunächst auch überraschend, kann aber nach einer kurzen Diskussion damit plausibilisiert werden, dass vom Lenkrad aus alles gesteuert wird und dort deshalb viele Bedienelemente angesiedelt sind.

### Alignment-Matrix

Zur Berechnung der Alignment-Matrix wird einerseits die Matrix ausgeleitet, die die jeweilige Anzahl der ermittelten Abstimmungsbedarfe zwischen den Teammitgliedern anzeigt (Abbildung 6-7, links oben). Andererseits zeigt die Distanzmatrix (Abbildung 6-7, rechts oben) die organisationale Distanz zwischen den Studierenden. Hier sei angemerkt, dass die organisationale Distanz nur für Personenpaarungen angegeben ist, für die mindestens ein Abstimmungsbedarf ermittelt wurde (sonst ist der Wert 0 angegeben). Die minimale Distanz beträgt 2 zwischen Mitgliedern des gleichen Baugruppentteams. Mit der in dieser Fallstudie vorliegenden Modellierung der Organisationsstruktur ist die maximale Distanz 4 zwischen Mitgliedern unterschiedlicher Baugruppentteams.



Handlungsbedarf zur expliziten Koordinationsplanung gesehen wird. Diese Einschätzung wird von *Schulz* geteilt, der als Baugruppenleiter bei der Präsentation der Analyseergebnisse anwesend ist.

Die Distanzmatrix zeigt, dass es viele baugruppenübergreifende Personenpaarungen mit Abstimmungsbedarf gibt (Distanz = 4). Bei der Verrechnung der Anzahl Abstimmungsbedarfe mit der Distanz in der Alignment-Matrix (Abbildung 6-7, unten) fallen vor allem die Paarungen *Heider – Suarez* und *Schulz – Suarez* auf. *Suarez* ist für die Entwicklung der Wanne zuständig, die als sehr kritisch identifiziert wurde. Hierauf sollte bei der Koordinationsplanung besonderes Augenmerk gelegt werden.

### Detaillierte Analysen

Die TOP 5 Abstimmungsbedarfe (Tabelle 6-1) ergeben sich aus technischen Abhängigkeiten zwischen Komponentenpaarungen mit der höchsten gemittelten Kritikalität und bestehen zwischen Personen, die unterschiedlichen Baugruppen-Teams angehören. Aufgrund der hohen Kritikalität des Kabelbaums ist er an vier der fünf relevantesten Abstimmungsbedarfe beteiligt. Die leitenden Teammitglieder äußern zwar während der Präsentation der Analyseergebnisse, dass der Kabelbaum keine so kritische Rolle spielt. In der anschließenden Diskussion wird jedoch klar, dass der Kabelbaum aufgrund der vielen Informationsschnittstellen in Bezug auf die damit einhergehende Abstimmung trotzdem als kritisch angesehen werden kann.

Tabelle 6-1 TOP 5 Abstimmungsbedarfe in der Fallstudie TUFast.

|   |  | <b>A</b>                                  | <b>B</b>                  | <b>Ursache/<br/>Potential</b> | <b>Gemittelte<br/>Kritikalität</b> | <b>Distanz</b> |
|---|--|---|---------------------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------|
| 1 | Organisationseinheit<br>Produktelement | Mayerhofer<br>Kabelbaum                   | Suarez<br>Wanne           | Direkte<br>Relation           | 401                                | 4              |
| 2 | Organisationseinheit<br>Produktelement | Mühlbauer<br>Telemetrie-<br>Rechenplatine | Gücükoglu<br>Achse Hinten | Direkte<br>Relation           | 293                                | 4              |
| 3 | Organisationseinheit<br>Produktelement | Mayerhofer<br>Kabelbaum                   | Schlegel<br>Kupplung      | Direkte<br>Relation           | 292                                | 4              |
| 4 | Organisationseinheit<br>Produktelement | Mayerhofer<br>Kabelbaum                   | Schütz<br>Fahrwerksbox    | Analytisch<br>Indirekt 2      | 270                                | 4              |
| 5 | Organisationseinheit<br>Produktelement | Mayerhofer<br>Kabelbaum                   | Peis<br>Gepäckfach        | Analytisch<br>Indirekt 2      | 270                                | 4              |

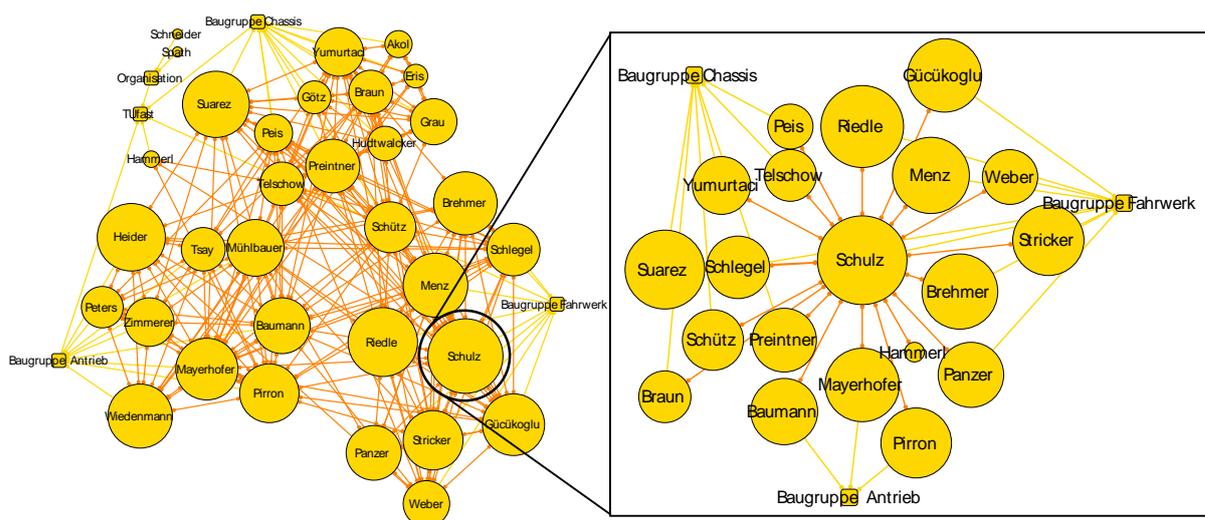
In der Präsentation werden weitere Visualisierungen zur detaillierteren Analyse, die sich aus den abgeleiteten Zusammenhängen erstellen lassen, beispielhaft aufgezeigt. Zum Beispiel können die einzelnen Abstimmungsbedarfe zwischen zwei Personen aufgelistet werden (Tabelle 6-2). Die technisch-logische Abhängigkeit *Analytisch Indirekt 2* als Ursache bzw. Potential für notwendige Koordination deutet darauf hin, dass eine der beiden betroffenen

Komponenten Teil einer dritten Komponente ist, die eine direkte Relation zur anderen Komponente aufweist.

*Tabelle 6-2 Beispielhafte Auflistung der einzelnen potentiellen Abstimmungsbedarfe zwischen Schulz und Suarez (Distanz = 4) zur detaillierten Analyse.*

| Schulz                   | Suarez                         | Ursache/ Potential    |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Federung Hinten          | Wanne                          | Direkte Relation      |
| Anbindung Chassis Hinten | Anbindung Vorderbau (vorne)    | Analytisch Indirekt 2 |
| Umlenkhebel Hinten       | Anbindung Vorderbau (vorne)    | Analytisch Indirekt 2 |
| Anbindung Chassis Hinten | Anbindung Fahrwerksbox (vorne) | Analytisch Indirekt 2 |
| Umlenkhebel hinten       | Anbindung Fahrwerksbox (vorne) | Analytisch Indirekt 2 |
| Umlenkhebel hinten       | Inserts Gepäckfach (hinten)    | Analytisch Indirekt 2 |
| Umlenkhebel hinten       | Inserts Hinterbau (hinten)     | Analytisch Indirekt 2 |
| Umlenkhebel hinten       | Inserts Dämpfer (hinten)       | Analytisch Indirekt 2 |
| Federelemente Hinten     | Anbindung Vorderbau (vorne)    | Analytisch Indirekt 2 |
| Federelemente Hinten     | Inserts Gepäckfach (hinten)    | Analytisch Indirekt 2 |

Abbildung 6-8 (links) stellt eine weitere Visualisierungsmöglichkeit dafür dar, wer mit wem (orangene Kanten) und insgesamt wieviel (Knotengröße) Abstimmungsbedarf hat. Durch Zentrierung eines Individuums und Ausblendung nicht relevanter anderer Knoten kann für einzelne Personen das personenzentrierte Koordinationsnetz erstellt werden (Abbildung 6-8, rechts). Es zeigt auf einem Blick, mit wem diese Person Abstimmungsbedarf hat.



*Abbildung 6-8 Visualisierung der Abstimmungsbedarfe auf Organisationsebene in einem Netzwerk (links) und Ableitung eines personenzentrierten Koordinationsnetzes (rechts) in der Fallstudie TUfast.*

### 6.2.5 Fazit

Insgesamt halten die leitenden Teammitglieder die Analyseergebnisse für plausibel und sind überrascht, wie gut die Ergebnisse die Realität widerspiegeln. Ein Vorteil der durchgeführten Analysen wird bei der Betrachtung der Rolle des Kabelbaums deutlich. Da der Kabelbaum als sehr flexibel und leicht anpassbar betrachtet wird, gilt er in den Köpfen der Baugruppenleiter als weniger kritisch. In einer Diskussion wird jedoch klar, dass der Kabelbaum aufgrund der vielen Informationsschnittstellen in Bezug auf die damit einhergehende Abstimmung trotzdem als kritisch anzusehen ist.

Im Rahmen der Fallstudie konnten aus Zeitgründen auf Basis der Analyseergebnisse keine gezielten Koordinationsmaßnahmen abgeleitet werden. Zu dem Zeitpunkt, zu dem die Modellierung der Baustruktur und die Schnittstellenanalyse abgeschlossen werden konnte, war die Konstruktionsphase bereits weit voran geschritten. Die Modellierung verzögerte sich, weil die Ermittlung der Relationen unter dem vorherrschenden Zeitdruck in der Konstruktionsphase von den TUfast-Mitgliedern niedriger priorisiert werden musste. Letztlich stellt die Modellierung des Projektsystems in dieser Fallstudie nur ein geringes Erkenntnispotential zur Verfügung, da lediglich die Baustruktur, direkte Relationen zwischen Komponenten, die Teamstruktur (Aufteilung der Beteiligten auf drei Teams) und die Verknüpfung der Produkt- und Organisationssicht mittels Verantwortlichkeiten einfließen. Die Vereinigung dieser Daten führt zu relativ trivialen Analyseergebnissen. Durch eine Konkretisierung der Schnittstellen und der tatsächlich vorhandenen organisationalen Beziehungen (wer kennt wen, wer arbeitet mit wem wie stark zusammen) könnten differenziertere Analyseergebnisse erzielt werden.

Aus Sicht des Autors liegt der größte Vorteil einer Modellierung der Zusammenhänge im Projektsystem bei TUfast darin, diese bei Veränderungen schnell überblicken zu können. Sollte zum Beispiel ein Teammitglied überraschend ausfallen und seine Aufgaben von jemand anderes übernommen werden, kann sich diejenige bzw. derjenige schnell einen Überblick über Abstimmungsbedarfe verschaffen. Außerdem können eventuelle Hemmnisse (z. B. fehlende Bekanntschaft) zwischen Teammitgliedern durch unterschiedliche Koordinationsmaßnahmen gezielt abgebaut werden.

## 6.3 Fallstudie Anlagenbau

In dieser Fallstudie wird ein Entwicklungsprojekt bei der BHS Corrugated Maschinen- und Anlagenbau GmbH (im Folgenden: BHS) untersucht. Das bayerische Unternehmen bietet Anlagen zur Herstellung und Verarbeitung von Wellpappe als kundenspezifische Systemlösung für ihre Kunden an. In dem betrachteten Entwicklungsprojekt wird die Realisierung einer neuen Hauptfunktion entwickelt, wobei Lösungen für einen großen Teil der dafür notwendigen Aggregate (Teilsysteme der Anlage) von bestehenden Anlagen übernommen und angepasst werden können. Das für die Hauptfunktion ausschlaggebende Aggregat wird gemeinsam mit einem Partnerunternehmen aus dem Ausland entwickelt, das eine hohe Expertise für die zu realisierende Funktion in einem anderen Anwendungsbereich hat. Zum Zeitpunkt der Analyse des Projekts wird die Konzeptphase gerade abgeschlossen.

Die Komplexität des betrachteten Projekts ergibt sich vor allem aus folgenden Faktoren:

- Bei der Anlage handelt es sich um ein **mechatronisches System**, das eine übergeordnete Hauptfunktion erfüllen soll. Es führt ein durchgängiger Materialfluss durch das Gesamtsystem, weshalb sich das System aus **hoch integrierten Teilsystemen** zusammensetzt. Jedes Teilsystem stellt wiederum ein mechatronisches System dar.
- Die Anlage muss für spätere Kundenprojekte leicht angepasst werden können, weshalb eine gewisse **Flexibilität** vorgehalten werden muss.
- Im Sinne einer **Gleich-/Wiederholteile-Strategie** sollen in der Anlage möglichst baugleiche Lösungen zur Erfüllung von wiederholt vorkommenden Funktionen (z. B. Führung der Papierbahn, Konditionierung der Papierbahn etc.) verwendet werden.
- Ein Großteil der notwendigen Aggregate der Anlage erfüllen Teilfunktionen, die in Anlagen des bisherigen Produktspektrums gelöst sind. Diese Lösungen können übernommen und angepasst werden. Die Lösung der neuen Hauptfunktion im Rahmen des geplanten Anwendungsbereichs ist jedoch mit **großer Unsicherheit** behaftet.
- Die Entwicklung wird in **Kooperation mit einem Partner** aus einem anderen Kulturkreis durchgeführt. Die Kommunikation erfolgt auf Englisch, was für beide Partner keine Muttersprache ist. Hinzu kommen mögliche **Verständnisprobleme**, weil beide Kooperationspartner aus unterschiedlichen Branchen mit verschiedenem Know-how stammen. Außerdem arbeiten sie in **unterschiedlichen Zeitzonen**.
- Vereinzelte Entwicklungsumfänge sind auf **Entwicklungsdienstleister** ausgelagert bzw. werden von Extern bezogen. Diese werden dann teilweise intern nochmals angepasst (z. B. konstruktive Anpassungen oder Programmierung der Steuerung).
- Das Entwicklungsteam des betrachteten Unternehmens ist zwar vollständig für das Entwicklungsprojekt abgestellt, es werden jedoch im Laufe der Entwicklung zusätzliche **Kapazitäten aus der Linienorganisation** des Unternehmens benötigt. Das Kernteam besteht zum Zeitpunkt der Analyse aus zwölf Personen.
- Insgesamt werden zwei Teil-Teams basierend auf den Disziplinen Mechanik und Prozesstechnik (Elektrik/Elektronik und Software) unterschieden. Es gibt einen Gesamtprojektleiter, der außerdem ein spezifisches Teil-Team leitet und als Ingenieur auch selbst an der Entwicklung beteiligt ist. Eine weitere Person leitet ebenfalls ein Teil-Team und ist selbst Entwickler. Eine zusätzliche Gruppierung der Teammitglieder basiert auf unterschiedlichen Teilfunktionen der Anlage, wobei für jede Gruppe einer der zwei Teil-Teamleiter oder eine dritte Person, die größtenteils als Projektleiter fungiert und Know-how bzgl. der neuen Funktion mit einbringt, verantwortlich ist.

Im Folgenden werden die Teilschritte der strukturbasierten Koordinationsplanung beschrieben. Die im Schritt 4 beschriebenen Analyseergebnisse wurden in einem Workshop beim Industriepartner präsentiert und diskutiert. An dem dreistündigen Workshop nahmen fünf Projektbeteiligte teil, darunter der Gesamtprojektleiter, ein Projektleiter, zwei Konstrukteure und ein Elektroingenieur.

### 6.3.1 Schritt 1: Vorbereitung

Insgesamt wurden in der Vorbereitungsphase zwei Gespräche geführt. Das erste Gespräch mit dem Gesamtprojektleiter zielte darauf ab, ein grundlegendes Verständnis über das Entwicklungsprojekt aufzubauen und verfügbare Daten über das Projekt zu identifizieren. Folgende Dateien konnten als **Datengrundlage** zur Verfügung gestellt werden:

- *Organigramm* des Gesamtunternehmens als PDF-Datei
- *Funktionsbetrachtung* (Blackbox-Betrachtung) der Gesamtanlage als Excel-Datei
- *Maschinenstruktur* bzw. Stückliste zum derzeitigen Zeitpunkt als PDF-Datei
- *Terminplan* für das Gesamtprojekt als Excel-Datei
- „*Projektstruktur*“, d. h. die funktionsorientierte Struktur mit jeweiligen Gruppenleitern als PDF-Datei

Nachdem die bereitgestellten Daten auf keiner formalen Modellierung basieren, wurden die Daten vom Autor manuell in einen Datengraphen überführt. Bei der Modellierung auftretende Fragen und Unstimmigkeiten wurden in einem zweiten Gespräch geklärt. Die zusätzliche Bereitstellung einer Abbildung des Maschinenlayouts erhöhte zudem das Systemverständnis. Im Folgenden werden die erhobenen Daten gegliedert nach Produkt-, Prozess- und Organisationssystem anonymisiert beschrieben.

#### Produktsystem

Zur Modellierung des Produktsystems dienen einerseits die *Funktionsbetrachtung* und andererseits die *Maschinenstruktur*. In der Funktionsbetrachtung sind insgesamt 19 **Funktionen** mit jeweiligen Ein- und Ausgangsgrößen spezifiziert, was die Modellierung kinetischer Flüsse auf Funktionsebene ermöglicht. In einigen Fällen sind Flüsse als Input bzw. Output einer Funktion angegeben (z. B. Versorgungsspannung), für die in der Funktionsbetrachtung keine andere Funktion spezifiziert ist. In diesen Fällen wird eine Hilfsfunktion erstellt (z. B. Versorgungsspannung bereitstellen). Für eine Funktion sind drei alternative **Wirkprinzipien** als Lösungsmöglichkeiten angegeben.

Die verfügbare *Maschinenstruktur* gibt Aufschluss über geplante Funktionsträger (**Komponenten**) auf Baugruppenebene, und wie diese zu Modulen bzw. Aggregaten zusammengefasst werden. In Kombination mit der „*Projektstruktur*“, in der die Baugruppen bestimmten Funktionsgruppen zugeordnet sind, lässt sich ableiten, welche Baugruppe an der Erfüllung welcher Funktion beteiligt ist. Letztendlich wird diese Zuordnung von Komponenten und Funktionen mit dem Gesamtprojektleiter zur Überprüfung durchgesprochen. Der resultierende Datengraph ist in Abbildung 6-9 abgebildet und enthält 81 Funktionen, 62 Komponenten und 395 kybernetische Flüsse.

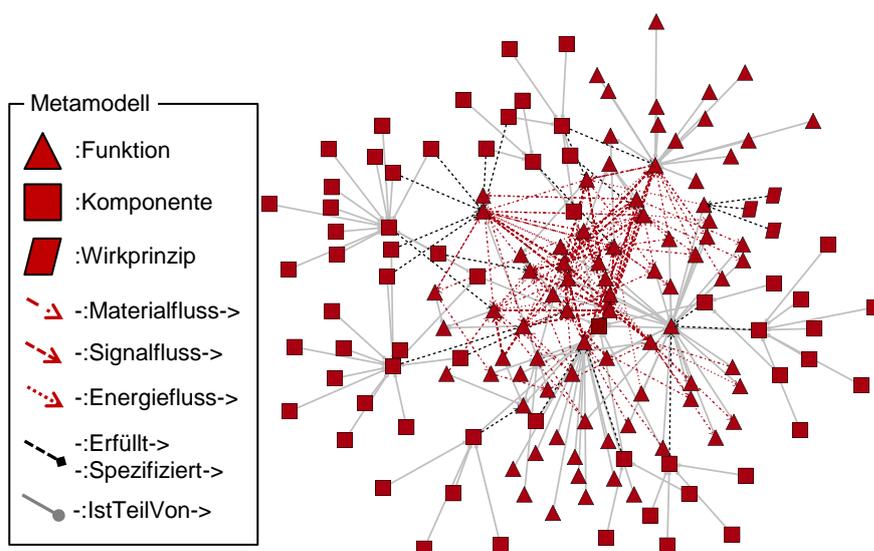


Abbildung 6-9 Metamodell (instanziierte Knoten- und Kantenklassen) und Datengraph des Produktsystems in der Fallstudie Anlagenbau.

## Prozesssystem

Ein *Terminplan* in Form einer Excel-Liste gibt Aufschluss über die geplanten **Entwicklungsaktivitäten**. Die Aktivitäten sind darin teilweise in Bezug auf Funktionen und teilweise in Bezug auf Baugruppen zusammengefasst (hier als **Prozessphasen** modelliert). Die angegebenen Aktivitäten pro Phase sind Kombinationen aus den Prozessschritten Konzept, Konstruktion, Grobkonstruktion, Detailkonstruktion, Programmierung, Detaillierung, Beschaffung und Installation. Obwohl die Konzeptphase bereits als abgeschlossen gilt, werden alle angegebenen Aktivitäten ungeachtet dessen, ob sie teilweise bereits in der Vergangenheit liegen, modelliert. Die Präzedenz zwischen den einzelnen Aktivitäten einer Phase ist nicht explizit angegeben, lassen sich jedoch grob aus der zeitlichen Reihenfolge der Aktivitäten im Terminplan ableiten. Insgesamt sind vier Meilensteine angegeben, wobei deren logische Einordnung im Gesamtprozess nicht eindeutig interpretiert werden kann, weshalb sie im Graphen isolierte Knoten darstellen. Der resultierende Graph (Abbildung 6-10) enthält 167 Entwicklungsaktivitäten, die zu 33 Entwicklungsphasen gruppiert werden können. Diese Phasen sind wiederum Teil von sieben übergeordneten Entwicklungsphasen.

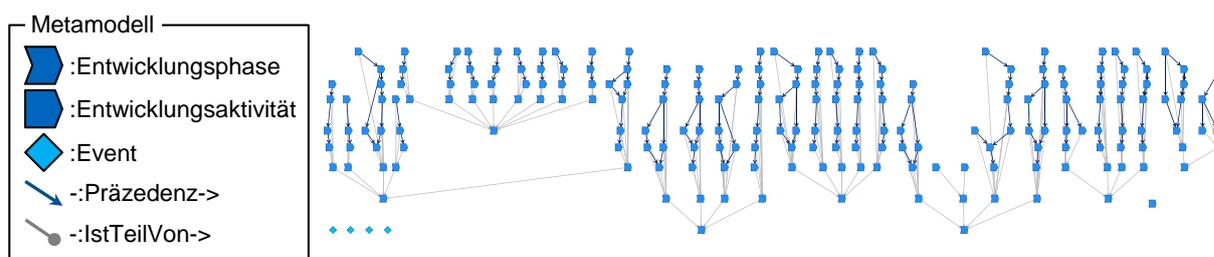


Abbildung 6-10 Metamodell (instanziierte Knoten- und Kantenklassen) und Datengraph des Prozesssystems in der Fallstudie Anlagenbau.

## Organisationssystem

Basierend auf dem *Unternehmensorganigramm* und mündlichen Auskünften des Gesamtprojektleiters können die Abteilungs- und Teamstruktur bis auf Mitarbeiterebene modelliert werden (Abbildung 6-11). Anhand der Abteilungs- bzw. Teambezeichnungen sowie nach Rücksprache mit dem Gesamtprojektleiter können die am Projekt beteiligten Personen (**Individuen**) zusätzlich unterschiedlichen Disziplinen (**Expertisen**) zugeordnet werden.

Im Datengraphen sind die meisten Individuen einem Teil-Team zugeordnet. Jedes Teil-Team ist im Organigramm auch einer **Abteilung** zugeordnet. Die jeweiligen Teil-Teamleiter sind direkt der entsprechenden Abteilung zugeordnet. Durch diese Modellierung kann die organisationale Distanz zusätzlich interpretiert werden: Bei einer Distanz größer zwei sind die Organisationseinheiten weder im gleichen Team noch gehören sie zur gleichen Disziplin. Eine Distanz von drei deutet auf unterschiedliche Hierarchien hin (Teammitglied – Teamleiter). Das für die Analyse relevante Organisationssystem besteht insgesamt aus 39 Knoten und 46 Kanten.

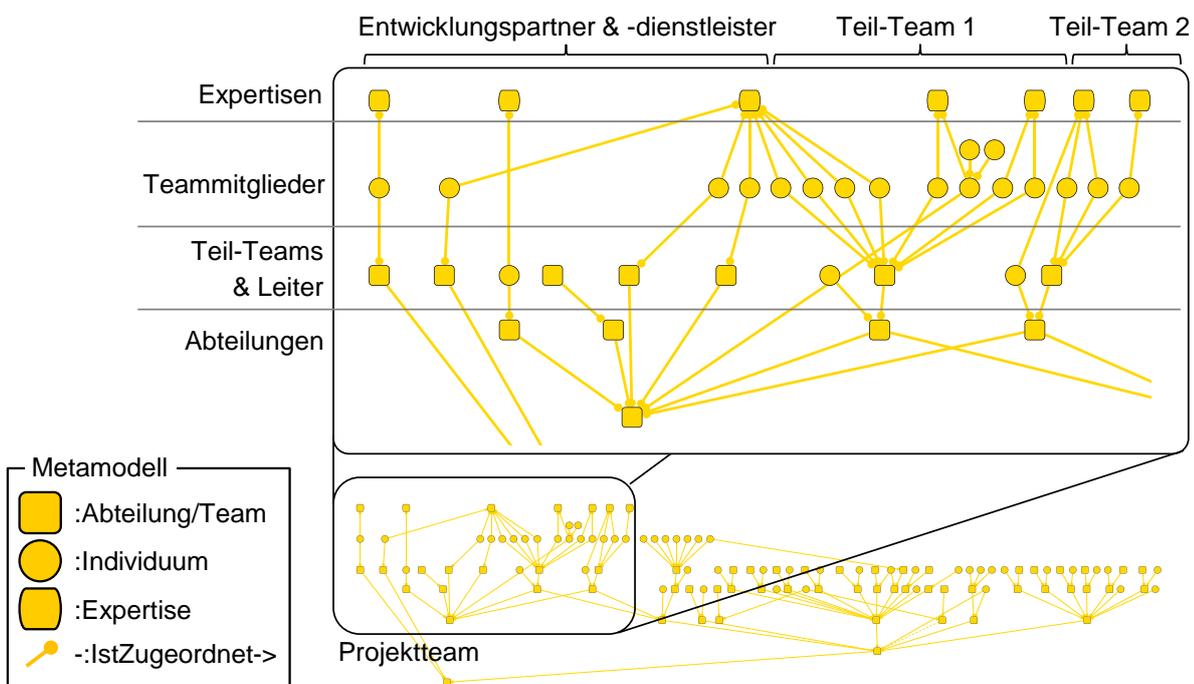


Abbildung 6-11 Metamodell (instanziierte Knoten- und Kantenklassen) und Datengraph des Organisationssystems in der Fallstudie Anlagenbau.

### 6.3.2 Schritt 2: Integration

Die Verknüpfung von Produktsystem und Prozesssystem wird durch die Interpretation der Namen für die Prozessgruppen, die im *Terminplan* angegeben sind, möglich. Somit können die Phasen teilweise Funktionen und teilweise bereits konkreten Komponenten zugeordnet werden (:Prozessphase -:Erzeugt/Bearbeitet-> :Produktelement).

Der Terminplan enthält außerdem Daten über die Zuordnung von Organisations- und Prozesssystem. Der Arbeitsaufwand in Tagen ist darin für einzelne organisatorische Einheiten (Individuen, Abteilungen) pro Aktivität geplant. Da die Daten in der Exceltabelle in einer Matrix systematisiert sind, können diese automatisiert eingelesen werden. Auf diese Weise werden insgesamt 675 Kanten nach folgendem Muster erzeugt:

:Organisationseinheit -:FührtAus- :Entwicklungsaktivität

Die angegebenen nominalen Arbeitsaufwände pro Organisationseinheit werden als Attribut der Kanten gespeichert. Es fällt auf, dass in der Regel mehrere Organisationseinheiten für eine Entwicklungsaktivität eingeplant sind. Der eingebrachte Arbeitsaufwand variiert dabei jedoch von einem Tag bis zu 200 Tagen. Das lässt darauf schließen, dass die Hauptarbeit einer Aktivität von einer bzw. wenigen Personen durchgeführt wird, und andere Personen zur vereinzelt Mitarbeit eingeplant sind. In wenigen Fällen ist eine Abteilung einer Aktivität zugeordnet, wenn für die entsprechende Arbeit noch keine Person definiert ist.

Es sind keine Details über den Entwicklungspartner bekannt. Deshalb wird dieser als einzelne Organisationseinheit (dort sind ca. 20 Personen beteiligt) mit einer Prozessphase als Repräsentant seiner Entwicklungsarbeit, und diese Prozessphase wiederum mit entsprechenden Produktelementen manuell verknüpft. Alles in allem ergibt sich ein Datengraph mit insgesamt 474 Knoten und 1752 Kanten (Abbildung 6-12).

Zusätzlich ist bekannt, dass sich das Projektteam einen gemeinsamen Büroraum teilt und dass keine regelmäßigen Besprechungen geplant sind (stattdessen finden Abstimmungen nach Bedarf ad-hoc statt).

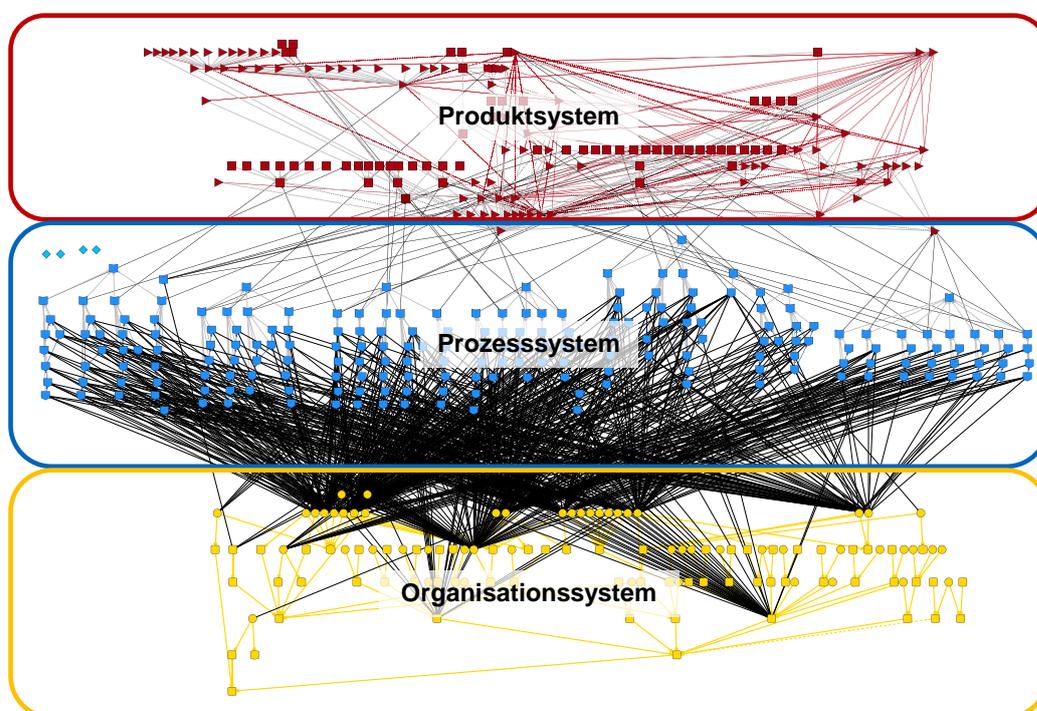


Abbildung 6-12 Integrierter Datengraph des untersuchten Projektsystems in der Fallstudie Anlagenbau.

### 6.3.3 Schritt 3: Analyse

#### Notwendige Anpassungen der Analyse

Bei der Analyse muss die zugrunde liegende Datenstruktur beachtet werden. In dieser Fallstudie bestehen die Zuordnungen zwischen Produkt- und Organisationssystem auf das Prozesssystem auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen. Das führt einerseits dazu, dass die Regeln zur Ableitung von Abstimmungsbedarf aus Prozess- und Organisationsebene angepasst werden müssen, indem die Dekomposition von Prozessphasen in Entwicklungsaktivitäten mit berücksichtigt wird (vgl. Abbildung 6-13).

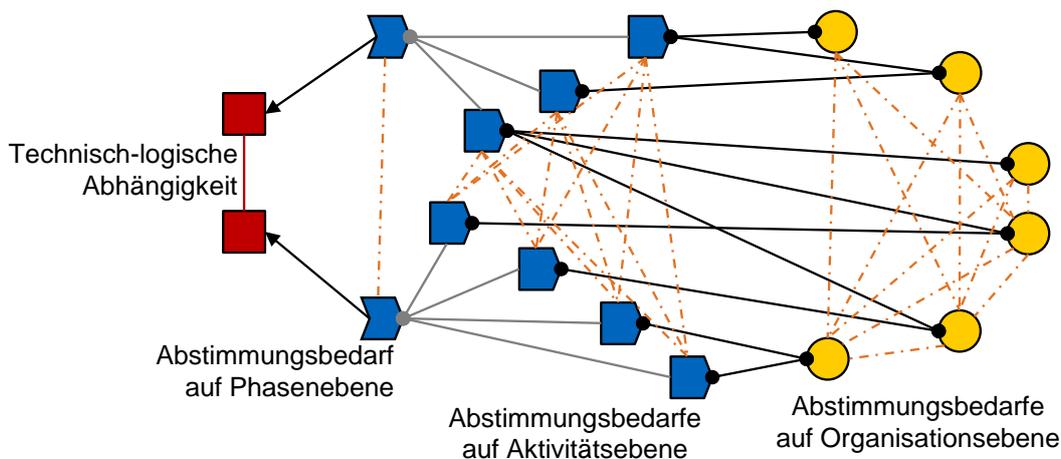


Abbildung 6-13 Grundprinzip zur Ableitung von Abstimmungsbedarfen in der Fallstudie Anlagenbau.

Andererseits ist die Anzahl der abgeleiteten Abstimmungsbedarfe sehr groß. Ein Abstimmungsbedarf zwischen einer Phase mit  $n$  Aktivitäten und einer Phase mit  $m$  Aktivitäten führt zu  $n * m$  Abstimmungsbedarfen zwischen den entsprechenden Aktivitäten. Sind zudem  $u$  bzw.  $v$  Organisationseinheiten jeweils zwei zu koordinierenden Aktivitäten zugeordnet, ergibt sich die Anzahl der Abstimmungsbedarfe  $K$  auf Organisationsebene wie folgt:

$$K = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_i v_j$$

Wenn Organisationseinheiten mehreren Aktivitäten zugeordnet sind, ergeben sich zwischen zwei Organisationseinheiten teilweise mehrere Abstimmungsbedarfe, die auf der gleichen analytischen Produktrelation aber unterschiedlichen Aktivitäten basieren (in Abbildung 6-13 sind überlagerte Abstimmungsbedarfe mit nur einer Kante dargestellt).

Die Anzahl abgeleiteter Abstimmungsbedarfe wird daraufhin reduziert, indem zwei Aspekte bei der Ableitung berücksichtigt werden:

- Ein Abstimmungsbedarf auf Organisationsebene wird nur dann abgeleitet, wenn die Organisationseinheiten maßgeblich in die Aktivität involviert sind. Für die Implementierung

wird angenommen, dass eine Organisationseinheit dafür mit mehr als drei Tagen Aufwand an einer Aktivität beteiligt ist. Diese Unterscheidung wäre nicht notwendig, wenn bei der Zuordnung von Organisationssystem und Prozesssystem differenziert werden kann (z. B. nach RACI, siehe Kapitel 5.2.5).

- Zwischen zwei Organisationseinheiten A und B wird nur dann ein Abstimmungsbedarf abgeleitet, wenn weder A noch B in beiden zu koordinierenden Aktivitäten involviert ist (unabhängig davon mit wie viel Aufwand bzw. auf welche Art und Weise).

Die entsprechende Anpassung der Regeln zur Ableitung von Abstimmungsbedarfen auf Organisationsebene ist in Abbildung 6-14 illustriert. A und D haben kein Abstimmungsbedarf, weil dieser maßgeblich zwischen A und C zu sehen ist. Analog gilt das für B und D, wobei zusätzlich B bereits in Aktivität 3 involviert ist. Deshalb wird auch kein Abstimmungsbedarf zwischen B und C abgeleitet (es gäbe zwar einen möglichen Abstimmungsbedarf, dieser ist aber bereits durch die Zuteilung von B zu Aktivität 3 adressiert).

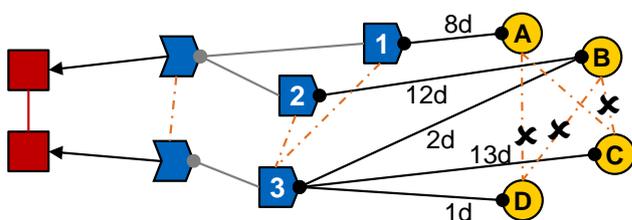


Abbildung 6-14 Veranschaulichung der Regeln zur Ableitung von Abstimmungsbedarf auf Organisationsebene.

## Analyseergebnisse

Insgesamt ergeben sich nach Anpassung der Analyseregeln 1074 Abstimmungsbedarfe auf Prozessebene und 679 Abstimmungsbedarfe auf Organisationsebene. Die Analyseergebnisse werden im nachfolgenden Kapitel zusammengefasst und jeweils diskutiert.

### 6.3.4 Schritt 4: Interpretation – Feedback vom Industriepartner

#### Portfolio-Darstellung Produktsystem

Zunächst ermöglicht die Betrachtung des Einflussportfolios eine Einschätzung über kritische Produktelemente (Abbildung 6-15). Das Portfolio dient außerdem als erste Plausibilitätsprüfung der Daten. An dieser Stelle sei angemerkt, dass in dieser Fallstudie lediglich Daten über kybernetische Flussbeziehungen auf Funktionsebene vorliegen.

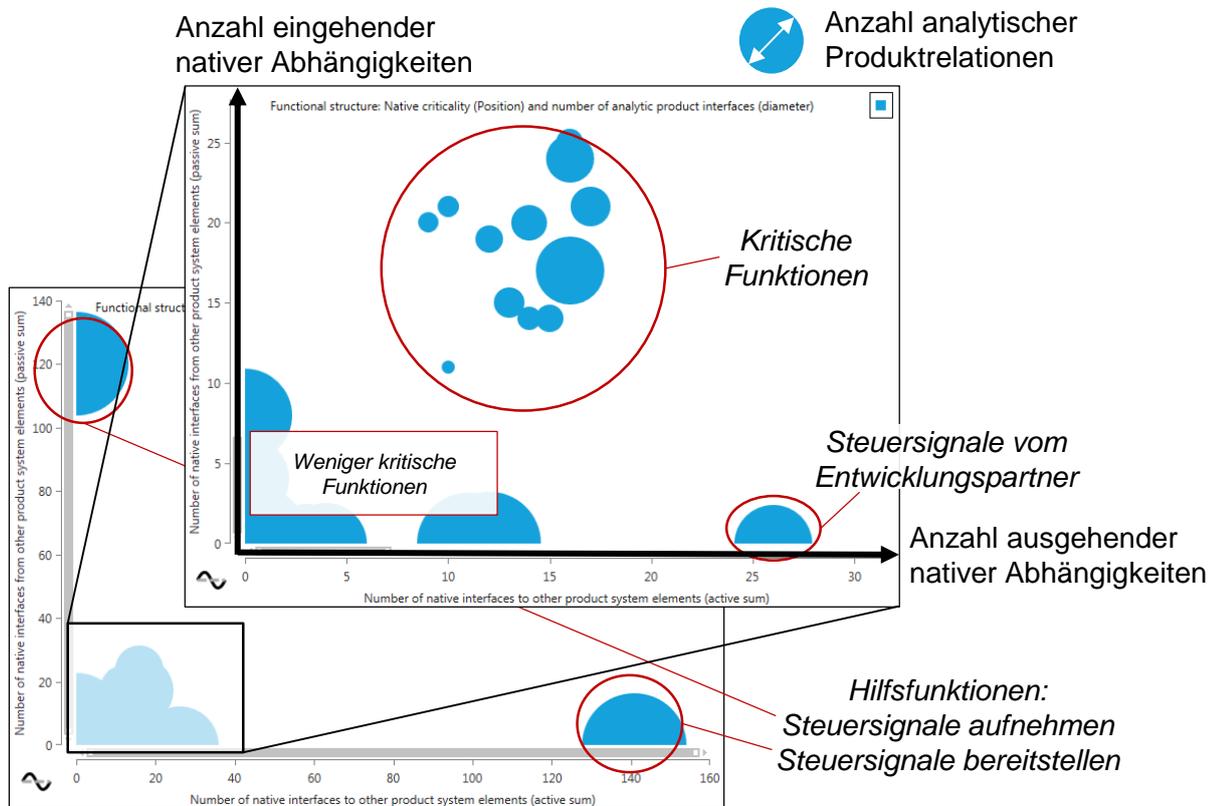


Abbildung 6-15 Einflussportfolio in der Fallstudie Anlagenbau.

Es fallen sofort zwei Funktionen auf, die eine sehr hohe Aktivsumme bzw. Passivsumme haben. Es handelt sich um zwei eingeführte Hilfsfunktionen für die Aufnahme und Bereitstellung von Steuersignalen, die als Teilfunktionen der übergeordneten Steuerung eingeführt wurden. Generell fällt die Anzahl von Informationsschnittstellen (293 Signalflüsse) relativ stark ins Gewicht (im Vergleich: 71 Materialflüsse und 31 Energieflüsse), weshalb die Einteilung differenziert betrachtet werden sollte. Die Funktionen mit hoher Kritikalität werden von den Workshop-Teilnehmern ebenfalls als kritisch eingestuft. Bei einer Funktion, für die zusätzlich eine verhältnismäßig hohe Anzahl analytischer Produktrelationen abgeleitet wurde, handelt es sich zudem tatsächlich um eine indirekt stark eingebettete Funktion, die die Anlage an mehreren Stellen betrifft. Auffallend ist außerdem eine Funktion, die die Steuersignale seitens des Entwicklungspartners bereitstellt. Sie wird von den Workshop-Teilnehmern ebenfalls als sehr wichtig für die Koordination angesehen. Schließlich zeigt das Einflussportfolio in Abbildung 6-15, dass einige weniger kritisch einzustufende Funktionen trotzdem eine hohe Anzahl analytischer Relationen aufweisen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass es sich um Teilfunktionen handelt, deren übergeordnete Funktion viele Relationen aufweist.

Während in den nativen Daten keine Relationen auf Komponentenebene spezifiziert sind, lassen sich anhand der Produktarchitektur indirekte Relationen für Komponenten ableiten. Abbildung 6-16 gibt einen Überblick über die Anzahl ermittelter analytischer Produktrelationen für die unterschiedlichen Komponenten.

### Anzahl analytischer Produktrelationen

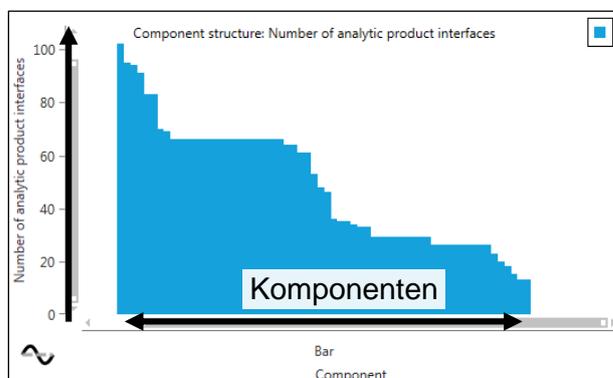


Abbildung 6-16 Anzahl analytischer Produktrelationen für Komponenten in der Fallstudie Anlagenbau.

Insgesamt lässt sich zur Betrachtung der Produktstruktur festhalten, dass die zugrunde liegenden nativen Daten nicht ideal sind. Die Workshop-Teilnehmer äußern Misstrauen über die Analyseergebnisse, weil sie die Daten für teilweise unvollständig halten, was die Einteilung im Portfolio verzerrt. Tatsächlich sind Funktionen und Komponenten auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen miteinander verknüpft, weshalb übergeordnete Funktionen als unkritisch eingestuft werden, obwohl ihre Teilfunktionen kritisch sind.

### Alignment-Matrix

Die durch die Analyse ermittelte relative Verteilung der Abstimmungsbedarfe (vgl. Abbildung 6-17) deckt sich mit den Erwartungen der Workshop-Teilnehmer. Bei Organisationseinheit (OE) 5 mit den meisten ermittelten Abstimmungsbedarfen handelt es sich um den Elektroingenieur, der für die übergeordnete Steuerung der Anlage zuständig ist und viele Informationsschnittstellen (Signalflüsse) abzustimmen hat. Auch bei den anderen Organisationseinheiten mit einer hohen Anzahl abgeleiteter Abstimmungsbedarfe handelt es sich um Personen, die koordinierende Aufgaben im Projekt übernehmen. Bei OE 9, OE 10 und OE 13 handelt es sich zum Beispiel um die Teamleiter. Besonders auffallend ist das ungünstige Zusammenspiel (*alignment*) zwischen OE 8 und OE 9 sowie zwischen OE 3 und OE 9, die einerseits eine hohe Anzahl gegenseitiger Abstimmungsbedarfe haben und andererseits sowohl unterschiedlichen Teams als auch unterschiedlichen Disziplinen angehören. OE 9 ist der Prozesstechnik zugeordnet und verantwortet die Peripherie sowie Vor- und Nachbehandlungsstufen in der Gesamtanlage. OE 8 ist für die Maschinensteuerung von Anlagenbestandteilen zuständig, die sich über die gesamte Anlage erstrecken. OE 3 ist als Konstrukteur maßgeblich an der Konstruktion dieser Anlagenbestandteile beteiligt.

Die Alignment-Matrix spiegelt auch insofern die Realität gut wider, dass es sich bei den Organisationseinheiten OE 6, OE 11 und OE 15 um externe Entwicklungsdienstleister handelt. Bei OE 16, OE 17 und OE 18 handelt es sich um unternehmensinterne Abteilungen, die Entwicklungskapazitäten auf Abruf zur Verfügung stellen. Hier wird jedoch auch eine Schwach-

stelle der Analyse deutlich: Die Abteilung OE 18 hat vermeintlich viele Abstimmungsbedarfe, entsprechende Konstrukteure werden aber nur zur reinen Ausdetaillierung der Konstruktionen und zur Beschaffung eingesetzt. Im Workshop wird angemerkt, dass für diese Tätigkeiten eigentlich keine Abstimmung bezüglich der Schnittstellen mehr notwendig sein sollte. Eine Diskussion unter den Workshop-Teilnehmern ergibt, dass es in Einzelfällen trotzdem Abstimmungsbedarf geben kann und entsprechende Relationen im Auge behalten werden sollten.

Anzahl Abstimmungsbedarfe

|      | OE1 | OE2 | OE3 | OE4 | OE5 | OE6 | OE7 | OE8 | OE9 | OE10 | OE11 | OE12 | OE13 | OE14 | OE15 | OE16 | OE17 | OE18 | OE19 | OE20 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| OE1  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE2  | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE3  | 4   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE4  | 3   | 4   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE5  | 1   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE6  | 2   | 7   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE7  | 8   | 0   | 7   | 13  | 24  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE8  | 6   | 2   | 3   | 5   | 8   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE9  | 1   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE10 | 14  | 8   | 7   | 10  | 13  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE11 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE12 | 6   | 6   | 2   | 2   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE13 | 5   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE14 | 5   | 6   | 3   | 4   | 21  | 11  | 3   | 0   | 7   | 0    | 4    | 3    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE15 | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE16 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE17 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE18 | 0   | 2   | 2   | 2   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE19 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE20 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

Alignment-Matrix

|       | OE1 | OE2 | OE3 | OE4 | OE5 | OE6 | OE7 | OE8 | OE9 | OE10 | OE11 | OE12 | OE13 | OE14 | OE15 | OE16 | OE17 | OE18 | OE19 | OE20 | Anzahl Abstimmungsbedarfe |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------------|
| OE 1  |     | 50  | 100 | 0   | 50  | 0   | 200 | 0   | 175 | 224  | 0    | 96   | 80   | 125  | 0    | 0    | 0    | 360  | 0    | 0    | 63                        |
| OE 2  | 50  |     | 8   | 125 | 64  | 72  | 0   | 80  | 72  | 200  | 0    | 24   | 90   | 24   | 36   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 80                        |
| OE 3  | 100 | 8   |     | 100 | 80  | 0   | 28  | 12  | 576 | 175  | 0    | 8    | 12   | 0    | 0    | 0    | 0    | 50   | 0    | 4    | 71                        |
| OE 4  | 0   | 125 | 100 |     | 0   | 0   | 325 | 0   | 175 | 160  | 0    | 48   | 224  | 200  | 0    | 0    | 0    | 72   | 0    | 25   | 67                        |
| OE 5  | 50  | 64  | 80  | 0   |     | 108 | 96  | 20  | 288 | 325  | 48   | 64   | 117  | 84   | 0    | 32   | 0    | 250  | 96   | 16   | 154                       |
| OE 6  | 0   | 72  | 0   | 0   | 108 |     | 0   | 0   | 4   | 0    | 16   | 0    | 75   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 10                        |
| OE 7  | 200 | 0   | 28  | 325 | 96  | 0   |     | 24  | 72  | 0    | 0    | 32   | 0    | 44   | 0    | 8    | 100  | 200  | 32   | 16   | 105                       |
| OE 8  | 0   | 80  | 12  | 0   | 20  | 0   | 24  |     | 792 | 50   | 32   | 176  | 171  | 12   | 0    | 160  | 0    | 100  | 240  | 4    | 123                       |
| OE 9  | 175 | 72  | 576 | 175 | 288 | 4   | 72  | 792 |     | 12   | 32   | 225  | 50   | 0    | 0    | 98   | 0    | 200  | 50   | 360  | 103                       |
| OE 10 | 224 | 200 | 175 | 160 | 325 | 0   | 0   | 50  | 12  |      | 0    | 240  | 0    | 175  | 0    | 0    | 16   | 288  | 0    | 25   | 99                        |
| OE 11 | 0   | 0   | 0   | 0   | 48  | 16  | 0   | 32  | 32  | 0    |      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 8                         |
| OE 12 | 96  | 24  | 8   | 48  | 64  | 0   | 32  | 176 | 225 | 240  | 0    |      | 0    | 16   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 8    | 74                        |
| OE 13 | 80  | 90  | 0   | 224 | 117 | 75  | 0   | 171 | 50  | 0    | 0    | 0    |      | 27   | 0    | 100  | 0    | 256  | 32   | 117  | 104                       |
| OE 14 | 125 | 24  | 12  | 200 | 84  | 0   | 44  | 12  | 0   | 175  | 0    | 16   | 27   |      | 0    | 0    | 100  | 100  | 8    | 0    | 81                        |
| OE 15 | 0   | 36  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1                         |
| OE 16 | 0   | 0   | 0   | 0   | 32  | 0   | 8   | 160 | 98  | 0    | 0    | 0    | 0    | 100  | 0    |      | 0    | 0    | 0    | 0    | 20                        |
| OE 17 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 100 | 0   | 0   | 16   | 0    | 0    | 0    | 100  | 0    | 0    |      | 0    | 8    | 0    | 11                        |
| OE 18 | 360 | 0   | 50  | 72  | 250 | 0   | 200 | 100 | 200 | 288  | 0    | 0    | 256  | 100  | 0    | 0    | 8    |      | 360  | 50   | 96                        |
| OE 19 | 0   | 0   | 0   | 0   | 96  | 0   | 32  | 240 | 50  | 0    | 0    | 8    | 32   | 8    | 0    | 0    | 0    | 360  |      | 0    | 47                        |
| OE 20 | 0   | 0   | 4   | 25  | 16  | 0   | 16  | 4   | 360 | 25   | 0    | 64   | 117  | 0    | 0    | 0    | 0    | 50   | 0    |      | 41                        |

Distanz

|      | OE1 | OE2 | OE3 | OE4 | OE5 | OE6 | OE7 | OE8 | OE9 | OE10 | OE11 | OE12 | OE13 | OE14 | OE15 | OE16 | OE17 | OE18 | OE19 | OE20 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| OE1  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE2  | 3   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE3  | 5   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE4  | 5   | 3   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE5  | 1   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE6  | 2   | 7   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE7  | 8   | 0   | 7   | 13  | 24  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE8  | 6   | 2   | 3   | 5   | 8   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE9  | 1   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE10 | 14  | 8   | 7   | 10  | 13  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE11 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE12 | 6   | 6   | 2   | 2   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE13 | 5   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE14 | 5   | 6   | 3   | 4   | 21  | 11  | 3   | 0   | 7   | 0    | 4    | 3    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE15 | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE16 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE17 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE18 | 0   | 2   | 2   | 2   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE19 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| OE20 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

Abbildung 6-17 Alignment-Matrix in der Fallstudie Anlagenbau.

### Detaillierte Analysen

Die Auflistung der TOP 5 Abstimmungsbedarfe bietet detailliertere Einblicke in die Analyseergebnisse (Tabelle 6-3). Die Informationen für diese Auflistung lassen sich ebenfalls automatisiert aus dem durch die Analyse erzeugten Datengraphen extrahieren. Beispielhaft soll hier der relevanteste Abstimmungsbedarf diskutiert werden. Dieser wird zwischen OE 9 und OE 18 in Bezug auf einen möglichen Zusammenhang zwischen zwei als sehr kritisch eingestuften Funktionen gesehen. Die analytische Relation als Ursache/Potential des Abstimmungsbedarfs beruht auf der Tatsache, dass beide Funktionen Teil einer übergeordneten Funktion sind (in den nativen Daten ist keine direkte Relation spezifiziert). Der Abstimmungsbedarf wird letztlich daher erzeugt, weil die Organisationseinheiten an unterschiedlichen Entwicklungsaktivitäten (Konzept und Detaillierung) beteiligt sind, die beide Funktionen betreffen. Die Organisationseinheiten sind von unterschiedlicher Disziplin und gehören zu unterschiedlichen Abteilungen. Bei genauerer Betrachtung der Strukturdaten wird deutlich, dass beide Organisationseinheiten gemeinsam in insgesamt elf Entwicklungsaktivitäten involviert sind und deshalb davon ausgegangen werden kann, dass sie entsprechend regelmäßig zusammenarbeiten und dadurch eine Abstimmung in Bezug auf die mögliche Relation begünstigt ist.

Nach Rücksprache mit den Workshop-Teilnehmern müssen auch diese Analyseergebnisse relativiert werden. Wie bereits angesprochen, sollte in Bezug auf die Tätigkeiten Detaillierung und Beschaffung keine Abstimmung mehr notwendig sein. Zusätzlich sind die Workshop-Teilnehmer über die hohe Kritikalität von Funktion 1 erstaunt. Die darüber entstehende Diskussion ist dahingehend interessant, dass die Funktion an sich als weniger kritisch wahrgenommen wird. Gleichzeitig wird aber deutlich, dass für die Entwicklung der Funktion tatsächlich einige Themen abgestimmt werden müssen.

Tabelle 6-3 TOP 5 Abstimmungsbedarfe in der Fallstudie Anlagenbau.

|                                   | A                | B                | Ursache/<br>Potential     | Gemittelte<br>Kritikalität | Distanz | Grad der allg.<br>Zusammen-<br>arbeit |  |
|-----------------------------------|------------------|------------------|---------------------------|----------------------------|---------|---------------------------------------|--|
| <b>Organisations-<br/>einheit</b> | OE 9             | OE 18            |                           |                            |         |                                       |  |
| <b>Prozess</b>                    | Konzept          | Detaillierung    | Gruppenzu-<br>gehörigkeit | 250                        | 5       | 11                                    |  |
| <b>Produktelement</b>             | Fkt. 1<br>Fkt. 2 | Fkt. 2<br>Fkt. 1 |                           |                            |         |                                       |  |
| <b>Organisations-<br/>einheit</b> | OE 19            | OE 8             |                           |                            |         |                                       |  |
| <b>Prozess</b>                    | Detaillierung    | Installation     | Gruppenzu-<br>gehörigkeit | 250                        | 4       | 3                                     |  |
| <b>Produktelement</b>             | Fkt. 1<br>Fkt. 2 | Fkt. 2<br>Fkt. 1 |                           |                            |         |                                       |  |
| <b>Organisations-<br/>einheit</b> | OE 19            | OE 18            |                           |                            |         |                                       |  |
| <b>Prozess</b>                    | Detailkonstr.    | Beschaffung      | Energiefluss              | 136                        | 6       | 8                                     |  |
| <b>Produktelement</b>             | Fkt. 3           | Ft. 4            |                           |                            |         |                                       |  |
| <b>Organisations-<br/>einheit</b> | OE 8             | OE 9             |                           |                            |         |                                       |  |
| <b>Prozess</b>                    | Programmierung   | Installation     | Indirekt<br>funktional    | 136                        | 6       | 26                                    |  |
| <b>Produktelement</b>             | Fkt. 5<br>Fkt. 4 | Fkt. 4<br>Fkt. 5 |                           |                            |         |                                       |  |
| <b>Organisations-<br/>einheit</b> | OE 18            | OE 4             |                           |                            |         |                                       |  |
| <b>Prozess</b>                    | Detaillierung    | Programmierung   | Signalfluss               | 114                        | 6       | 1                                     |  |
| <b>Produktelement</b>             | Fkt. 6<br>Fkt. 1 | Fkt. 1<br>Fkt. 6 |                           |                            |         |                                       |  |

Weitere, beispielhafte Detailanalysen konnten im Rahmen des Industrie-Workshops aus Zeitgründen nicht vertieft werden. Der Zeitrahmen des Workshops erlaubte es zudem nicht, gemeinsam konkrete Koordinationsmaßnahmen zu bestimmen.

### 6.3.5 Fazit

Die durchgeführte Analyse des Projektsystems ermöglicht anschauliche Einblicke in die Projektstruktur. Ein wesentlicher Bestandteil davon ist die Produktstruktur. Die Modellierung der

Produktstruktur und die quantitativen Analysemöglichkeiten bergen Potential zur Identifikation von Ungereimtheiten in der bisherigen Betrachtung des Produkts. Es werden Fragen aufgeworfen wie:

- Warum gilt Produktelement A als kritisch?
- Warum zählt Produktelement B nicht zu den kritischen Elementen?
- Welche Produktelemente müssen weiter detailliert werden?

Die Prozessstruktur ist in dem Fallbeispiel wenig hilfreich, ermöglicht es aber, die an der Entwicklung eines Produktelements beteiligten Organisationseinheiten zu identifizieren. Für jede Relation auf Produktebene lassen sich deshalb automatisiert davon betroffene Organisationseinheiten anzeigen.

Die Alignment-Matrix ermöglicht es auf einem Blick auffällige Zusammenhänge und Elemente im Projektnetzwerk zu identifizieren. In jedem Fall regen die Ergebnisse zum Nachdenken und zum Hinterfragen der zugrunde liegenden Strukturen an. Interessant ist dabei, dass nicht als kritisch empfundene Produktelemente in Bezug auf notwendige Koordination durchaus kritisch sein können. Auch wenn die Auswirkungen fehlender oder unzureichender Koordination für das entsprechende Produktelement gering sein mögen, lohnt es sich, diese bei der Koordinationsplanung zu berücksichtigen.

In der Fallstudie wird deutlich, dass die Gegenüberstellung der Anzahl Abstimmungsbedarfe und der organisationalen Distanz nur begrenzt aussagekräftig ist. Es ist stets wichtig den Kontext jedes einzelnen Abstimmungsbedarfs zu berücksichtigen (Welche Produktelemente sind betroffen? Ist die analytisch abgeleitete Relation gerechtfertigt? Welche Prozessschritte/ Organisationseinheiten sind betroffen?). Aufgrund der Notwendigkeit, jeweils den Kontext mit zu berücksichtigen, stellt die Größe der Datenmenge weiterhin eine Herausforderung dar. Außerdem zeigt die Fallstudie, wie wichtig die Qualität der Datengrundlage für die Ableitung aussagekräftiger Ergebnisse ist. Die Workshop-Teilnehmer bewerten die verwendeten Daten als unzureichend für die Ableitung valider Ergebnisse. Deshalb kann in der Fallstudie nicht ausreichend evaluiert werden, ob die Analyseergebnisse hilfreiche Hinweise zur Planung notwendiger Koordination liefern.

## 6.4 Ergebnisse der Fragebogenstudie

Die Einschätzung über den Nutzen des entwickelten Ansatzes zur strukturbasierten Koordinationsplanung wird durch einen Fragebogen für die Teilnehmer der Evaluationsworkshops ergänzt. Die gesammelten Antworten der Workshop-Teilnehmer aus den zwei Fallstudien werden hier zusammengefasst ausgewertet, wobei auf prägnante Unterschiede gesondert eingegangen wird. Insgesamt handelt es sich um sechs Antworten aus der Fallstudie TUfast und um fünf Antworten aus der Fallstudie Anlagenbau.

In Abbildung 6-18 ist die Verteilung der Antworten zur Einschätzung der Eignung verwendeter Strukturmerkmale als Indikatoren für die Relevanz eines identifizierten Abstimmungsbedarfs ersichtlich. Die Teilnehmer halten die drei Indikatoren *Kritikalität*, *Distanz* und *Nähe* tendenziell für geeignet. Zwei Teilnehmer seitens TUfast machten bezüglich des Indikators *Nähe* keine Angabe, nachdem dieser Indikator in der Fallstudie TUfast aufgrund der vorlie-

genden Datenstruktur nicht angewendet werden konnte. Stattdessen wurde der Indikator den TUfast-Teilnehmern nur theoretisch und beispielhaft vorgestellt.

|   | Stimme<br>nicht zu |        | Stimme<br>voll zu |        |        |
|---|--------------------|--------|-------------------|--------|--------|
| Die <b>Kritikalität</b> (Kennzahl aus der Produktstruktur) zweier Produktelemente mit einer technischen Abhängigkeit ist ein guter Indikator für die Wichtigkeit des damit einhergehenden Abstimmungsbedarfs.   | 1<br>o             | 2<br>o | 3<br>o            | 4<br>x | 5<br>o |
|   |                    |        | 4,09              |        |        |
| Die <b>Distanz</b> (Kennzahl aus der Organisationsstruktur) zwischen zwei Organisationseinheiten ist ein guter Indikator für den Widerstand gegen eine erfolgreiche Abstimmung.                                 | 1<br>o             | 2<br>o | 3<br>o            | 4<br>x | 5<br>o |
|   |                    |        | 4,09              |        |        |
| Die <b>Nähe</b> (Kennzahl aus der Organisations- und Prozessstruktur) zwischen zwei Organisationseinheiten ist ein guter Indikator für die Wahrscheinlichkeit einer Abstimmung auch ohne bewusste Koordination. | 1<br>o             | 2<br>o | 3<br>o            | 4<br>x | 5<br>o |
|   |                    |        | 4,22              |        |        |

x : Arithmetisches Mittel; ◀▶: Min, Max

Abbildung 6-18 Einschätzung der Teilnehmer über die Eignung der Strukturmerkmale als Indikatoren für die Relevanz eines Abstimmungsbedarfs (N=11).

Im Fragebogen konnten die Teilnehmer Ideen für weitere hilfreiche Indikatoren angeben. Hier wird deutlich, dass aus Sicht einiger Teilnehmer diverse weiche Faktoren wie Charaktereigenschaften (Kommunikator, Einzelgänger), Sympathie, kulturelle Unterschiede oder Sprachkenntnisse eine wichtige Rolle spielen könnten. Zusätzlich werden Faktoren wie die jeweilige Organisationsgröße, Standorte oder die zeitliche Verfügbarkeit (z. B. aufgrund von Auslandsaufenthalten im Fall der Studierenden von TUfast) genannt. Letztere Faktoren sind im Gegensatz zu den weichen Faktoren einfacher zu bemessen und könnten genutzt werden, sofern im spezifischen Anwendungsfall Daten dafür zur Verfügung stehen.

In der Diskussion der Analyseergebnisse im Rahmen der Workshops wurde bereits deutlich, dass die verwendete Datengrundlage insbesondere in der Fallstudie Anlagenbau unzureichend war, um daraus aussagekräftige Erkenntnisse abzuleiten. Dies spiegelt sich auch in der Bewertung der unterschiedlichen Visualisierungsformen zur Identifikation notwendiger Handlungsbedarfe wider (Abbildung 6-19). Die Antworten der Teilnehmer seitens des Industriepartners erweisen sich hier deutlich kritischer (Antwortspektrum jeweils von 2 bis 4) als die Antworten seitens TUfast (Antwortspektrum jeweils von 3 bis 5). Auffallend ist, dass die Bewertung der zwei leitenden Projektmitarbeiter von BHS deutlich besser ausfällt, als die Bewertung der Entwickler. Trotzdem schneidet die Auflistung der Abstimmungsbedarfe, die eher detaillierte Einblicke (u. a. auch für einzelne Projektbeteiligte) statt einen Überblick verschafft, tendenziell besser ab.

|  | Stimme<br>nicht zu |   | Stimme<br>voll zu |   |      |
|--|--------------------|---|-------------------|---|------|
| Die <b>Auflistung der Abstimmungsbedarfe</b> gibt relevante und hilfreiche Hinweise auf Handlungsbedarfe zur Reduktion des Koordinationsrisikos.   | 1                  | 2 | 3                 | 4 | 5    |
|  | o                  | o | o                 | o | o    |
|  |                    | ◆ | ◆                 | ◆ | ◆    |
|  |                    |   | ✕                 |   |      |
|  |                    |   |                   |   | 3,82 |
| Die <b>Alignment-Matrix</b> gibt relevante und hilfreiche Hinweise auf Handlungsbedarfe zur Reduktion des Koordinationsrisikos.  | 1                  | 2 | 3                 | 4 | 5    |
|  | o                  | o | o                 | o | o    |
|  |                    | ◆ | ◆                 | ◆ | ◆    |
|  |                    |   | ✕                 |   |      |
|  |                    |   |                   |   | 3,45 |
| Das <b>personenzentrierte Koordinationsnetz</b> der abgeleiteten Abstimmungsbedarfe zwischen Organisationseinheiten gibt hilfreiche Hinweise, zwischen welchen Organisationseinheiten ein Risiko zu geringer Koordination besteht. | 1                  | 2 | 3                 | 4 | 5    |
|  | o                  | o | o                 | o | o    |
|  |                    | ◆ | ◆                 | ◆ | ◆    |
|  |                    |   | ✕                 |   |      |
|  |                    |   |                   |   | 3,55 |

✕ : Arithmetisches Mittel; ◆ : Min, Max

Abbildung 6-19 Einschätzung der Teilnehmer über die Eignung der Visualisierungsformen zur Identifikation notwendiger Handlungsbedarfe (N=11).

Trotz offenbar geringem Erkenntnisgewinn aus den Analyseergebnissen in den Fallstudien halten die Teilnehmer den Ansatz prinzipiell für hilfreich (Abbildung 6-20). In Bezug auf die Plausibilität der Ergebnisse und die Verwendbarkeit zur gezielten Ableitung von Koordinationsmaßnahmen sind die Teilnehmer seitens der Industrie wieder kritischer als die Studierenden von TUfast, was mit der unzureichenden Datengrundlage erklärt werden kann.

|   | Stimme<br>nicht zu |   | Stimme<br>voll zu |   |      |
|---|--------------------|---|-------------------|---|------|
| Ich halte den Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung prinzipiell für hilfreich.  | 1                  | 2 | 3                 | 4 | 5    |
|   | o                  | o | o                 | o | o    |
|   |                    | ◆ | ◆                 | ◆ | ◆    |
|   |                    |   | ✕                 |   |      |
|   |                    |   |                   |   | 4,18 |
| Der Ansatz hat bisher unbekannte Abstimmungsbedarfe innerhalb der Entwicklung (aufgrund technischer Abhängigkeiten auf Produktebene) identifiziert. | 1                  | 2 | 3                 | 4 | 5    |
|   | o                  | o | o                 | o | o    |
|   |                    | ◆ | ◆                 | ◆ | ◆    |
|   |                    |   | ✕                 |   |      |
|   |                    |   |                   |   | 2,80 |
| Die Analyseergebnisse sind plausibel.   | 1                  | 2 | 3                 | 4 | 5    |
|   | o                  | o | o                 | o | o    |
|   |                    | ◆ | ◆                 | ◆ | ◆    |
|   |                    |   | ✕                 |   |      |
|   |                    |   |                   |   | 3,36 |
| Basierend auf den Analyseergebnissen lassen sich gezielt Koordinationsmaßnahmen planen und somit das Koordinationsrisiko reduzieren.                | 1                  | 2 | 3                 | 4 | 5    |
|   | o                  | o | o                 | o | o    |
|   |                    | ◆ | ◆                 | ◆ | ◆    |
|   |                    |   | ✕                 |   |      |
|   |                    |   |                   |   | 3,45 |

✕ : Arithmetisches Mittel; ◆ : Min, Max

Abbildung 6-20 Allgemeine Bewertung des Ansatzes zur strukturbasierten Koordinationsplanung durch die Teilnehmer (N=11).

## 6.5 Diskussion

Zur abschließenden Bewertung des Ansatzes wird dieser in einer Reflexion bezüglich zugrundeliegender Annahmen und der gestellten Anforderungen diskutiert und ein zusammenfassendes Fazit gezogen.

### 6.5.1 Reflexion

#### Annahmen

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz zielt darauf ab, die Identifikation von Abstimmungsbedarfen in komplexen Entwicklungsprojekten und darauf aufbauend die Ableitung geeigneter Koordinationsmaßnahmen zu unterstützen. Das Grundprinzip des Ansatzes stützt sich dabei auf zwei wesentliche Annahmen. So wird angenommen, dass notwendige Abstimmungen innerhalb der Entwicklung vorwiegend auf technischen Zusammenhängen bzw. Abhängigkeiten im Produkt basieren. Diverse Vorarbeiten zeigen, dass diese Annahme legitim ist [Biedermann & Lindemann 2011; Morelli *et al.* 1995; Sosa *et al.* 2004]. Trotzdem existieren neben solchen technisch-logischen Abhängigkeiten auch andere Arten von Abhängigkeiten, die in den vorliegenden Betrachtungen ausgeschlossen wurden.

Eine weitere Annahme ist, dass am Ende der Konzeptphase Informationen über die geplante Produktarchitektur zur Verfügung stehen, um sie für die Projektplanung in der Detaillierungsphase zu nutzen. Diese Annahme stützt sich auf verbreitete Lehren der Entwicklungsmethodik (vgl. z. B. Feldhusen & Grote [2013]; Ponn & Lindemann [2011]). Die zunehmende Digitalisierung der Entwicklungsarbeit und moderne Ansätze wie das Model-based Systems Engineering erlauben es außerdem damit zu rechnen, dass entsprechende Informationen formalisiert zur Verfügung stehen. Tatsächlich treffen diese Annahmen jedoch für viele Unternehmen (noch) nicht zu. Letztlich konnte für diese Arbeit leider kein Evaluationspartner gewonnen werden, bei dem die im Ansatz vorausgesetzte Datengrundlage in notwendigem Maße zur Verfügung steht.

#### Anforderungen

Insgesamt können die Anforderungen (vgl. Kapitel 5.1), auf denen die Entwicklung des Ansatzes aufgebaut hat, zu großen Teilen als erfüllt angesehen werden (Tabelle 6-4). Der Ansatz richtet sich mit den verschiedenen Indikatoren zur Relevanzbewertung und übersichtlichen Visualisierungen insbesondere an leitende Projektbeteiligte, um ihnen einen Überblick über relevante Abstimmungsbedarfe zu geben (A1). Zusätzlich ist eine Anwendung durch direkt an der Entwicklung beteiligte Personen denkbar, die sich dadurch einen spezifischen Überblick über mögliche Abstimmungsbedarfe verschaffen können, die sie betreffen.

Tabelle 6-4 Bewertung der Anforderungserfüllung des entwickelten Ansatzes.

| Anforderung                         | Erfüllungsgrad | Kurzerläuterung   |
|-------------------------------------|----------------|---|
| A1 Stakeholder                      | ●              | + Hauptanwender des Ansatzes sind Projektmanagerinnen und Projektmanager.<br>+ Erweiterte Anwendung durch Entwicklerinnen und Entwickler ist denkbar.   |
| A2 Einbettung in die Praxis         | ◐              | + Rechnerbasierter Rückgriff auf Entwicklungsdaten aus bestehenden IT-Systemen ist vorgesehen.<br>- Verfügbarkeit, Validität und Konsistenz aller notwendigen Daten ist nicht sichergestellt. Es Bedarf weiterer Unterstützung zur Datenaufbereitung und -konsolidierung. |
| A3 Kompatibilität bzw. Flexibilität | ◑              | + Erweiterbares Basis-Metamodell und Vererbungsprinzip stellen Kompatibilität und Flexibilität bezüglich anwendungsspezifischer Datengrundlagen sicher.<br>- Starke Einschränkung der Analysemöglichkeiten von Daten auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen.            |
| A4 Unterstützungsbeitrag            | ◑              | + Ansatz leitet potentielle Koordinationsbedarfe für diverse technisch-logische Abhängigkeiten auf Produktebene ab.<br>- Bei der Ableitung bleibt unberücksichtigt, ob die Abhängigkeit bereits in irgendeiner Form berücksichtigt ist.                                   |
| A5 Engineering Intelligence         | ●              | + Ansatz basiert vollständig auf dem Grundgedanken der Engineering Intelligence.  |
| A6 Erweiterbarkeit                  | ●              | + Ansatz bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Erweiterung.   |

○: nicht erfüllt; ◐: stark eingeschränkt erfüllt; ◑: eingeschränkt erfüllt; ●: größtenteils erfüllt;  
●: vollständig erfüllt

Der Ansatz ermöglicht es auf vorhandene Entwicklungsdaten zurück zu greifen und diese mit geringem Zusatzaufwand rechnerbasiert zu verarbeiten (A2). Wie bereits diskutiert, ist hierfür jedoch die Verfügbarkeit entsprechender Daten eine zwingende Voraussetzung. Außerdem muss davon ausgegangen werden, dass die Daten aus unterschiedlichen IT-Systemen in der heutigen industriellen Praxis nicht immer konsistent sind und generell häufig nicht valide (d. h. inkorrekt, unvollständig oder veraltet) sind. Um diesen Umständen zu begegnen ist zusätzliche Unterstützung zur Datenaufbereitung und -konsolidierung (vgl. Betrachtungen in Kissel [2014, S. 97-106]) notwendig.

Neben der Erweiterbarkeit des Basis-Metamodells ermöglicht es die Nutzung des Vererbungsprinzips, unterschiedliche Betrachtungsumfänge (z. B. Interpretation von Funktionen und Komponenten gleichermaßen als Produktelemente) bei den Analysen zu berücksichtigen (A3). Die vorgesehenen Strukturanalysen können jedoch nur bedingt mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden umgehen (vgl. notwendige Anpassungen der Analyse in der Fallstudie Anlagenbau, Kapitel 6.3.3). Hier besteht grundsätzlicher Forschungsbedarf im strukturellen Komplexitätsmanagement, wie Relationen zwischen Elementen auf variierenden Detaillierungsebenen in Strukturanalysen berücksichtigt werden können.

Große Mengen vorhandener Entwicklungsdaten bezüglich des Produkt-, Prozess- und Organisationssystems (Elemente, Relationen und Attribute) werden in einem integrierten Datengraphen zusammengefasst und so in eine auswertbare Form gebracht (A4). Mittels Graphentransformation werden alle denkbaren technisch-logischen Produktabhängigkeiten ermittelt und

entsprechender Abstimmungsbedarf zwischen betroffenen Elementen auf Prozess- und Organisationsebene abgeleitet.

Der entwickelte Ansatz baut auf dem Grundgedanken der *Engineering Intelligence* auf (A5). Der Rückgriff auf Daten aus bestehenden IT-Systemen macht es überflüssig, die Daten in einem zusätzlichen System zu pflegen und verhindert unnötige Inkonsistenzen durch doppelte Datenhaltung. Außerdem ist dadurch einerseits die Datengrundlage leichter anpassbar und die Modellierung des Projektsystems leichter erweiterbar. Nicht zuletzt lässt sich die Visualisierung der Ergebnisse flexibler an die individuellen Bedürfnisse anpassen.

Schließlich bietet der vorgesehene Projektdatengraph durch die Erweiterbarkeit sowohl des Metamodells als auch der Algorithmen und Regeln zur Graphentransformation eine wertvolle Datenbasis für die Durchführung weiterer Strukturanalysen und für die Ausleitung individueller Ansichten auf die Projektstruktur (A6).

## 6.5.2 Gesamtfazit

Der vorgestellte Ansatz zielt auf eine datengetriebene und rechnerbasierte Unterstützung der zielgerichteten Planung von Koordinationsmaßnahmen in komplexen Entwicklungsprojekten ab. Er zeigt eine Möglichkeit auf, wie aus vorhandenen Entwicklungsdaten ein integriertes Strukturmodell eines Entwicklungsprojekts erzeugt werden kann und wie dieses zur Identifikation und Bewertung von Abstimmungsbedarfen genutzt werden kann.

Anhand eines Software-Prototyps wird die grundsätzliche Anwendbarkeit des Ansatzes mit einem illustrativen Beispiel und in zwei Fallstudien nachgewiesen und prinzipiell gezeigt, dass der Ansatz die intendierte Unterstützung (unter Berücksichtigung der Annahmen) bietet. Die Ergebnisse der Fallstudien zeigen, dass der Ansatz insgesamt prinzipiell als hilfreich angesehen werden kann. Die vorgeschlagenen Indikatoren *Kritikalität*, *Distanz* und *Nähe* zur Bewertung der Relevanz von Abstimmungsbedarfen werden als geeignet betrachtet, es sind jedoch noch weitere Faktoren denkbar, die die Relevanz beeinflussen können. Der Nutzen des entwickelten Ansatzes konnte mangels verfügbarer Datengrundlagen nicht vollumfänglich evaluiert werden. Im Rahmen der zwei Fallstudien kann nicht nachgewiesen werden, dass die Identifikation und Bewertung von Abstimmungsbedarfen die zielgerichtete Definition geeigneter Koordinationsmaßnahmen unterstützt und dadurch eine Reduktion des Risikos für unzureichende oder fehlende Abstimmung im Projekt erreicht werden kann. Um hier ein abschließendes Fazit ziehen zu können ist es notwendig, den Ansatz in einem realen, komplexen Entwicklungsprojekt anzuwenden, in dem eine umfassende Datenbasis über das Produkt-, Prozess- und Organisationssystem zur Verfügung steht.

Trotzdem wird der vorgestellte Ansatz als wertvolle Basis zur Unterstützung der Verbesserung der Koordination einerseits, und zur allgemeinen Weiterentwicklung der Unterstützungsansätze zum Management komplexer Entwicklungsprojekte andererseits gesehen. Denn die strukturelle Analyse großer Strukturdatenmengen in Entwicklungsprojekten bietet nicht nur zur Betrachtung der Koordination großes Potential, sondern auch für die Optimierung des Gesamtsystems.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

*Dieses Kapitel liefert eine Zusammenfassung der Inhalte der Arbeit. Weiterhin werden der Forschungsbeitrag und Implikationen für die Praxis hervorgehoben. Den Abschluss bildet ein Ausblick auf weiterführende Forschungsbedarfe.*

### 7.1 Inhalt der Arbeit

Zunehmend modularisierte Produktportfolios und integrierte Systeme (mechatronische Produkte, Produkt-Service Systeme) sowie eine erhöhte Arbeitsteilung und -parallelisierung (u. a. in verteilter Entwicklung) sind beispielhafte Ursachen für die steigende Komplexität von Entwicklungsprojekten. Diese Umstände erfordern ein hohes Maß an Koordination, womit die Abstimmung der Entwicklungsabläufe und -beteiligten aufgrund diverser Abhängigkeiten aufeinander gemeint ist. Studien und prominente Beispiele wie die Entwicklung der Boeing 787 „Dreamliner“ zeigen, dass unzureichende oder fehlende Koordination einer der Hauptgründe für gescheiterte Projekte ist. Dies kann mit einem fehlenden Überblick über Abstimmungsbedarfe aufgrund der steigenden Projektkomplexität erklärt werden. Gleichzeitig ist die Planung der Koordination kein expliziter Bestandteil von Projektmanagementstandards und wird unzureichend methodisch unterstützt. Diese Motivation führt zur übergeordneten Zielstellung dieser Arbeit, die zielgerichtete Koordination in komplexen Entwicklungsprojekten zu fördern. Hierfür wird eine rechnerbasierte Unterstützung angestrebt.

Zur Bildung eines gemeinsamen Grundverständnisses werden in Kapitel 2 zunächst wichtige Begriffe definiert und theoretische Grundlagen über relevante Themenbereiche zusammengefasst. Die Betrachtungen in dieser Arbeit sind in den Kontext der integrierten Produktentwicklung und des Systems Engineering eingebettet. Das heißt, dass von einem systematischen und methodisch gestützten Vorgehen in der Entwicklung ausgegangen wird, in dem Grundlagen des Prozess- und Projektmanagements zur Anwendung kommen. Außerdem wird das „Denken in Systemen“ aufgegriffen, wobei nicht nur das zu entwickelnde Produkt (Produktsystem), sondern auch die Entwicklungsaktivitäten (Prozesssystem) und die entwickelnde Organisation (Organisationssystem) als Teilsysteme eines Entwicklungsprojektsystems betrachtet werden. Entsprechende Elemente und Relationen innerhalb und zwischen den Teilsystemen können in graphenbasierten oder matrixbasierten Strukturmodellen abgebildet werden. Dadurch wird die Analyse der Projektstruktur hinsichtlich der Abhängigkeiten im Entwicklungsprojekt, die zu Abstimmungsbedarfen und folglich zu Koordinationsbedarfen führen, ermöglicht. Die Analysen basieren dabei auf existierenden Ansätzen des strukturellen Komplexitätsmanagements.

Der recherchierte Stand der Forschung und Technik (Kapitel 3) liefert einen Überblick über vorhandene Modellierungsansätze und Modelle, die als Ausgangsbasis für strukturelle Analysen zur Unterstützung der Koordinationsplanung zur Verfügung stehen. Es zeigt sich, dass Elemente des Produktsystems (z. B. Funktionen, Komponenten) und ihre Zusammenhänge (z. B. kybernetische Flüsse, geometrische Bedingungen) bereits während der Konzeptphase in unterschiedlichen Produktmodellen abgebildet sind. Auf Prozessebene stellen die im Voraus

planbaren Informationsflüsse zwischen Entwicklungsaktivitäten, die in Prozess- und Terminplänen modelliert sind, eine Basis für Strukturbetrachtungen dar. Organigramme, in denen die Abteilungs- bzw. Teamstruktur abgebildet ist, eignen sich schließlich als Grundlage zur Modellierung der Organisationsstruktur. In Kapitel 3 wird anschließend *Koordination* im Kontext von Entwicklungsprojekten als das Management von Abhängigkeiten diskutiert. In der Literatur werden zwar unterschiedliche Koordinationsmechanismen benannt, es besteht jedoch keine methodische Unterstützung für die zielgerichtete Auswahl unterschiedlicher Maßnahmen. Zusätzlich werden vorhandene Methoden und Ansätze adressiert, die mittels strukturbasierter Analyse von Zusammenhängen in Entwicklungsprojekten Implikationen für die Koordination ableiten. Mehrere Forschungsarbeiten zeigen dabei, dass die meisten Abstimmungsbedarfe in einem Entwicklungsprojekt auf technische Zusammenhänge auf Produktebene zurück zu führen sind (z. B. Sosa *et al.* [2004]). Als wesentliche Schwachstelle identifizierter Ansätze kann festgehalten werden, dass die Daten zur Modellierung der Projektstruktur überwiegend manuell erhoben werden müssen. Außerdem schränkt eine vorwiegend matrixbasierte Modellierung die Möglichkeiten der Speicherung und Analyse relevanter Daten ein. Als vielversprechendes Konzept zur Modellierung und Analyse vorhandener Entwicklungsdaten wird schließlich ein Ansatz namens *Engineering Intelligence* [Helms & Kissel 2016] identifiziert. Darin wird eine automatisierbare Überführung vorhandener Daten in einen Datengraphen vorgesehen, welcher anschließend mittels selbst definierbaren Algorithmen und Regeln zur Graphentransformation analysiert werden kann.

Das fehlende Verständnis über die Rolle von Abhängigkeiten und über Bedarfe für Koordination werden in Kapitel 4 adressiert. Es wird aufgezeigt, dass sich grundsätzlich technische, organisatorisch-logische, ressourcenbezogene und soziale Abhängigkeiten unterscheiden lassen. Eine Sammlung von Charakteristika wie zum Beispiel *Stärke* oder *Konsequenz* einer Abhängigkeit samt möglicher Messgrößen soll es zudem ermöglichen, Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten objektiv erfassbar zu machen, um sie im Projektmanagement berücksichtigen zu können. Eine Recherche über Herausforderungen der Koordination ergibt sechs Kategorien: Fehler/Störungen, unnötige Arbeit, Diskrepanzen, Inkompatibilitäten, Trennung und Sequenz. Das Bewusstsein über diese Herausforderungen soll die Koordinationsplanung zusätzlich unterstützen.

Neben einem erweiterten Verständnis über Abhängigkeiten und Koordination präsentiert diese Arbeit in Kapitel 5 einen Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung, der auf den vorangegangenen Betrachtungen aufbaut. Die grundlegenden Anforderungen an den Ansatz orientieren sich an der Zielstellung, das Projektmanagement mit wenig Zusatzaufwand (d. h. rechnerunterstützt und basierend auf vorhandenen Daten) bei der gezielten Planung der Koordination zu unterstützen. Für die dafür zu analysierenden Strukturmodelle wird ein Basis-Metamodell vorgeschlagen, das eine flexible Modellierung der Elemente und Relationen des Produkt-, Prozess- und Organisationssystems erlaubt. Der Unterstützungsansatz besteht aus vier Teilschritten. Vorhandene Daten über das Produktkonzept (z. B. Funktionen, geplante Komponenten), notwendige Prozessschritte, am Projekt beteiligte Organisationseinheiten, und deren jeweilige Verknüpfung werden in den ersten beiden Schritten in einen integrierten Datengraphen überführt. Sofern die Daten in IT-Systemen formal repräsentiert sind, kann dieser Vorgang mittels Algorithmen zum Datenimport automatisiert werden. Im dritten Schritt wer-

den dann vollkommen rechnerbasiert potentielle Abstimmungsbedarfe auf Basis technischer Abhängigkeiten abgeleitet und strukturelle Merkmale als Indikatoren für die Relevanz eines Abstimmungsbedarfs berechnet. Unterschiedliche Visualisierungsmöglichkeiten der Analyseergebnisse unterstützen deren Interpretation (Schritt 4) und geben Hinweise auf Handlungsbedarfe zur Planung konkreter Koordinationsmaßnahmen.

Der entwickelte Lösungsansatz ist in einem Software-Prototyp implementiert, anhand dessen die grundsätzliche Anwendbarkeit mit einem illustrativen Beispiel (Kapitel 5) und in zwei Fallstudien (Kapitel 6.2 und 6.3) aufgezeigt wird. Die Studien machen deutlich, dass die Aussagekraft der Analysen stark von der Validität der zugrunde liegenden Daten abhängig ist. Diese hat sich in den Fallstudien als unzureichend erwiesen. Die Rückmeldung von Projektbeteiligten in den Fallstudien zeigt jedoch, dass der Ansatz und die Analyseergebnisse prinzipiell als hilfreich angesehen werden.

## 7.2 Ergebnisbeitrag für Forschung und Industrie

### Forschungsbeitrag

Der Forschungsbeitrag der vorliegenden Arbeit ist zweigeteilt. Einerseits tragen die vorgestellten theoretischen Betrachtungen (Kapitel 4) zum allgemeinen Verständnis im Umgang mit Abhängigkeiten in der Entwicklung bei. Andererseits präsentiert diese Arbeit als einzige eine datengetriebene, graphenbasierte und integrierte Strukturbetrachtung von Entwicklungssystemen und zeigt die damit einhergehenden Potentiale auf.

Während es umfassende Betrachtungen der Relationen und Zusammenhänge auf Produktebene gibt (Kapitel 2.2.3), existieren in der Produktentwicklungsliteratur nur wenig detaillierte Beschreibungen der Abhängigkeiten auf Prozess- und Organisationsebene innerhalb eines Entwicklungsprojekts. Diese werden vereinfachend als notwendiger Informationsfluss bzw. als Interaktions-, Kommunikations- oder Abstimmungsbedarf interpretiert. Die vorliegende Arbeit zeigt auf, dass diese Abhängigkeiten weitaus differenzierter betrachtet werden können. Basierend auf Literaturrecherchen und auf einer industriellen Fallstudie wird ein Kategorisierungsschema für Abhängigkeitsarten präsentiert, die in Entwicklungsprojekten relevant sind (Kapitel 4.1). Außerdem werden mögliche Charakteristika und Messgrößen zusammengetragen, um Abhängigkeiten detaillierter untersuchen zu können (Kapitel 4.2). Schließlich werden sechs typische Herausforderungen zusammengefasst, die eine Koordination in Entwicklungsprojekten erschweren können (Kapitel 4.3). Dadurch wird ein breites Grundverständnis geschaffen, um das Management von Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten intensiver beforschen zu können.

Die theoretischen Betrachtungen werden durch einen praxisorientierten Ansatz ergänzt, der die Identifikation und Bewertung von Abstimmungsbedarfen in komplexen Entwicklungsprojekten mittels Strukturanalysen unterstützt. Existierende Ansätze zur Strukturanalyse basieren vorwiegend auf einer matrixbasierten Repräsentation der Elemente und Relationen, was die Analysemöglichkeiten einschränkt. Außerdem analysieren diese häufig nur die Strukturen innerhalb eines bzw. zwischen zwei der Teilsysteme eines Projekts. Die Analysen stützen sich in der Regel zudem auf manuell modellierte Daten, was deren Anwendung aufwändig macht

und den Transfer in die industrielle Praxis erschwert. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz adressiert alle drei Limitationen, in dem das Grundkonzept der *Engineering Intelligence* [Helms & Kissel 2016] auf die Untersuchung komplexer Entwicklungsprojekte übertragen wird. Während der Ansatz im speziellen zur strukturbasierten Koordinationsplanung dient, veranschaulicht er die Vorteile einer graphenbasierten Repräsentation von Strukturdaten. Diese offenbaren sich insbesondere bei der Analyse von Systemen, die sich aus vielen, teilweise sogar verschachtelten Element- und Relationstypen zusammensetzen. Durch frei definierbare Algorithmen und Regeln zur Graphentransformation können aufwändige Strukturanalysen (z. B. mit Bedingungen) durchgeführt werden. Das eröffnet neue Möglichkeiten zur generalen, integrierten Betrachtung und Analyse von Entwicklungsprojektsystemen.

### **Implikationen für die Praxis**

Der Ergebnisbeitrag für die Industrie ergibt sich ebenfalls aus dem erarbeiteten erweiterten Verständnis für Abhängigkeiten und Koordination sowie dem entwickelten Ansatz. Die Theoriebildung über Abhängigkeiten in Entwicklungsprojekten soll letztlich das Verständnis über das Phänomen in der Industrie erhöhen. Sowohl die Unterscheidung der Abhängigkeitsarten als auch die Auflistung typischer Herausforderungen soll Praktikerinnen und Praktiker sensibilisieren und sie grundsätzlich dazu befähigen, Abhängigkeiten und Koordinationsbedarfe bewusst zu adressieren.

Der entwickelte Unterstützungsansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung erweist sich als ein prinzipiell hilfreicher Ansatz, mögliche Handlungsbedarfe bezüglich der Koordination von technisch-logischen Abhängigkeiten auf Produktebene in Entwicklungsprojekten aufzudecken. Der Ansatz gibt dabei Hinweise auf Abstimmungsbedarfe, die im spezifischen Anwendungsfall auf Plausibilität geprüft und interpretiert werden müssen. Die Stärke des Ansatzes ist, dass er auf vorhandenen Entwicklungsdaten aufbaut und die Analyse damit automatisierbar macht. Neben einem einmaligem Aufwand zur Anpassung des Metamodells und der Algorithmen zur Datenintegration erzeugt die Analyse der Daten also nur geringen Zusatzaufwand. Dieser sollte durch die mögliche Reduktion des Risikos für Aufwände aufgrund fehlender oder unzureichender Koordination gerechtfertigt sein. Die Verwendung vorhandener Daten ist dabei gleichzeitig die Hauptlimitation des Ansatzes, weil in vielen Unternehmen die Digitalisierung der Entwicklungsarbeit und moderne Entwicklungsansätze wie das Model-based Systems Engineering noch nicht weit genug fortgeschritten sind. Hier ist aber mit einer zunehmenden Verbreitung der Digitalisierung und mit einer steigenden Verfügbarkeit von Daten zu rechnen.

### **7.3 Ausblick**

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse zur strukturbasierten Koordinationsplanung in komplexen Entwicklungsprojekten stellen ein konzeptionelles Rahmenwerk für weiterführende Forschungsbemühungen dar. Konkrete Erweiterungspotentiale des Unterstützungsansatzes hinsichtlich der verwendeten Datengrundlage, Analysemöglichkeiten, Visualisierungsmöglichkeiten und des Anwendungskontexts werden in Kapitel 5.5 aufgezeigt. Im Folgenden wird auf damit einhergehende und weitere Forschungsdirektiven eingegangen.

## Datenbeschaffung und -analyse

Der Ansatz basiert auf der Annahme, dass richtige, vollständige, aktuelle und konsistente Entwicklungsdaten zur Analyse zur Verfügung stehen. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Datenaufbereitung und -konsolidierung zu unterstützen, wenn die Annahme nur eingeschränkt gilt. Kissel [2014, S. 97-106] liefert hierfür erste Lösungen. Durch intelligente Data Mining-Ansätze könnten Strukturdaten außerdem aus nicht formal modellierten Entwicklungsdokumentationen gewonnen werden.

Grundsätzlich ist der Trend zu integrierten Prozess- und Projektmanagementsystemen weiter zu beobachten und zu prüfen, wie der hier vorgestellte Ansatz mit diesen kombiniert werden kann. Ein vielversprechendes Konzept stellt hier beispielsweise auch das sogenannte *Adaptive Case Management* (vgl. Swenson [2010]) dar, das sich als Methode für das Management wissensintensiver Prozesse (z. B. Entwicklungsprozesse) etabliert.

Eine grundlegende Herausforderung stellt in der Strukturmodellierung weiterhin der Umgang mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden dar. Bei der manuellen Modellierung kann auf einen einheitlichen Detaillierungsgrad geachtet werden. Für datengetriebene Strukturmodelle werden dagegen Analyseansätze benötigt, die bezüglich variierender Detaillierungsgrade robust sind. Hier ist eine graphenbasierte Analyse gegenüber einer rein matrixbasierten Betrachtung von Vorteil, weil zum Beispiel das Vererbungsprinzip auf Metamodellebene oder die Verwendung von sogenannten Container-Knoten ausgenutzt werden kann.

## Abschließende Evaluation

Im Rahmen dieser Arbeit konnte der Nutzen des entwickelten Ansatzes nicht abschließend evaluiert werden. Hierfür ist es notwendig weitere Fallstudien mit komplexen Entwicklungsprojekten durchzuführen, in denen eine umfassende Datenbasis zur Analyse zur Verfügung steht. Die Anwendung des Ansatzes sollte von einer entsprechenden Projektleiterin bzw. einem Projektleiter selbst durchgeführt werden und darauf basierend Koordinationsmaßnahmen definiert werden. Um den endgültig angestrebten Nutzen des Ansatzes zu messen, sollten schließlich abgeschätzte Zusatzaufwände aufgrund fehlender oder unzureichender Koordination in diesen Projekten und in vergleichbaren Projekten abgeglichen werden.

## Ausweitung der Betrachtungen auf die Produktion

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus der Betrachtung auf der Koordination innerhalb der Entwicklung. Der nächste notwendige Schritt ist eine Ausweitung der Betrachtungen auf die Produktion, da die Planung bzw. Entwicklung des Produktionssystems (Produktionsprozesse und -mittel oder ganze Fabrikssysteme) mit der Produktentwicklung einhergeht und ein hohes Maß an Abstimmung zwischen den beiden Fachbereichen erfordert. Als Datenquelle zur Strukturmodellierung der Produktion können CAM-Modelle (Computer Aided Manufacturing), PPS-Systeme (Produktionsplanung und Steuerung) oder moderne Ansätze der Fabrikmodellierung (z. B. Schady [2008]) verwendet werden. Hierbei muss geprüft werden, wie die Produktsicht und die Produktionssicht verknüpft werden können und inwiefern eine integrierte Koordinationsplanung für Produktentwicklung und Produktion durch die Identifikation spezifischer Abstimmungsbedarfe das *Concurrent Engineering* weiter unterstützen kann.

### **Übertragung der Betrachtungen auf andere Bereiche**

Abschließend sei auf das Potential der Übertragung der in dieser Arbeit durchgeführten strukturellen Betrachtungen für Entwicklungsprojekte auf andere Projektarten hingewiesen. Insbesondere große Bauprojekte weisen ähnliche Charakteristika zu komplexen Entwicklungsprojekten auf und prominente Beispiele wie der Bau des Berliner Flughafens BER zeigen, dass es auch hier weiteren Unterstützungsbedarf bezüglich der Koordination gibt. Letztlich existieren heutzutage ebenfalls digitale Pläne des Bauobjekts (engl. *Building Information Model*, *BIM*), die als Ausgangsbasis für strukturelle Analysen verwendet werden können.



## 8. Literaturverzeichnis

- Aberdeen Group (2006). *The Mechatronics System Design Benchmark Report: Coordinating Engineering Disciplines*. Abgerufen von [http://m.plm.automation.siemens.com/en\\_us/Images/aberdeen\\_-\\_the\\_mechatronics\\_system\\_design\\_benchmark\\_report\\_06-08-31\\_tcm1224-4642.pdf](http://m.plm.automation.siemens.com/en_us/Images/aberdeen_-_the_mechatronics_system_design_benchmark_report_06-08-31_tcm1224-4642.pdf)
- Alexander, E. R. (1993). Interorganizational Coordination: Theory and Practice. *Journal of Planning Literature*, 7(4), S. 328–343.
- Artigues, C.; Demassez, S. & Neron, E. (Hrsg.) (2008). *Control systems, robotics and manufacturing series. Resource-constrained project scheduling: Models, algorithms, extensions and applications*. London, Hoboken, NJ: ISTE; Wiley.
- Baldwin, C.; MacCormack, A. & Rusnak, J. (2013). *Hidden Structure: Using Network Methods to Map System Architecture* (Harvard Business School Working Paper No. 13-093). Abgerufen von <http://nrs.harvard.edu/urn-3:HUL.InstRepos:10646422>
- Bar-El, R. & Malul, M. (2008). The role of external partners in regional cooperation projects in the Middle East. *The Economics of Peace and Security Journal*, 3(1).
- Bartolomei, J. E.; Hastings, D. E.; Neufville, R. de & Rhodes, D. H. (2012). Engineering Systems Multiple-Domain Matrix: An organizing framework for modeling large-scale complex systems. *Systems Engineering*, 15(1), S. 41–61.
- Batallas, D. A. & Yassine, A. A. (2006). Information Leaders in Product Development Organizational Networks: Social Network Analysis of the Design Structure Matrix. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 53(4), S. 570–582.
- Becker, J. & Kahn, D. (2005). Der Prozess im Fokus. In J. Becker, M. Kugeler, & M. Rosemann (Hrsg.), *Prozessmanagement. Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung* (5. Aufl.). Berlin: Springer.
- Bender, B. & Gericke, K. (2016). Entwicklungsprozesse. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 401–424). München: Carl Hanser Verlag.
- Bichlmaier, C. (2000). *Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen. Produktentwicklung: D65*. München: Utz; Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- Biedermann, W. (2014). *A minimal set of network metrics for analysing mechatronic product concepts* (Dissertation). Technische Universität München, München.
- Biedermann, W. & Lindemann, U. (2011). Prediction of Communication Structures based on Product Structures. In *Proceedings of the 13th International Dependency and Structure Modelling Conference*.
- Blanchard, B. S. & Blyler, J. E. (2016). *System engineering management* (Fifth edition). *Wiley series in systems engineering and management*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; Wiley.
- Blessing, L. T. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer London.

- Borgatti, S. P. (2005). Centrality and network flow. *Social Networks*, 27(1), S. 55–71.
- Borgatti, S. P.; Mehra, A.; Brass, D. J. & Labianca, G. (2009). Network Analysis in the Social Sciences. *Science*. (323), S. 892–895.
- Both, P. von (2006). *Ein systemisches Projektmodell für eine kooperative Planung komplexer Unikate*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe; Zugl. Karlsruhe: Univ. (TH), Diss. 2005.
- Braun, S. C.; Hellenbrand, D. & Lindemann, U. (2007). *Kostentransparenz in der Mechatronik: Eine Studie über Komplexitäts- und Kostentreiber mechatronischer Produkte*. Aachen: Shaker Online.
- Bréchet, Y. J. M. (2001). Interdisciplinary Training for Engineers — A Challenge Between Superficiality and Overspecialization. In D. Weichert, B. Rauhut, & R. Schmidt (Hrsg.), *Educating the Engineer for the 21st Century* (S. 65–74). Springer Netherlands.  
doi:10.1007/0-306-48394-7\_8
- Breidert, J. (2007). *Schnittstellengestaltung für die Baukastensynthese mit Beispielen aus der Formgedächtnisaktorik. Schriftenreihe // Institut für Konstruktionstechnik, Ruhr-Universität Bochum: Vol. 2007.4*. Aachen: Shaker; Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2006.
- Browning, T. R. (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), S. 292–306.
- Browning, T. R. (2009a). The many views of a process: Toward a process architecture framework for product development processes. *Systems Engineering*, 12(1), S. 69–90.
- Browning, T. R. (2009b). Using the Design Structure Matrix to Design Program Organizations. In A. P. Sage & W. B. Rouse (Hrsg.), *Wiley series in systems engineering and management. Handbook of systems engineering and management* (2. Aufl., S. 1401–1424). Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- Browning, T. R. (2016). Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 63(1), S. 27–52.
- Browning, T. R.; Fricke, E. & Negele, H. (2006). Key concepts in modeling product development processes. *Systems Engineering*, 9(2), S. 104–128.
- Browning, T. R. & Ramasesh, R. V. (2007). A Survey of Activity Network-Based Process Models for Managing Product Development Projects. *Production and Operations Management*, 16(2), S. 217–240.
- Browning, T. R. & Yassine, A. A. (2015). Managing a Portfolio of Product Development Projects under Resource Constraints. *Decision Sciences*, 46(5).
- Calleam (2016). Boeing Commercial Aeroplanes. Abgerufen von <http://calleam.com/WTPF/?p=4617>
- Carley, K. M.; Pfeffer, J.; Reminga, J.; Storricks, J. & Columbus, D. (2013). *ORA User's Guide 2013* (No. CMU-ISR-13-108). Pittsburgh, USA.

- Carroll, J. M.; Neale, D. C.; Isenhour, P. L.; Rosson, M. B. & McCrickard, D. (2003). Notification and awareness: synchronizing task-oriented collaborative activity. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58(5), S. 605–632.
- Chandrasegaran, S. K.; Ramani, K.; Sriram, R. D.; Horváth, I.; Bernard, A.; Harik, R. F. & Gao, W. (2013). The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems. *Computer-Aided Design*, 45(2), S. 204–228.
- Christian, A. (1995). *Simulation of Information Flow in Design* (PhD Thesis). Massachusetts Institute of Technology.
- Chucholowski, N.; Kriegler, J.; Hollauer, C.; Kattner, N.; Becerril, L.; Weidmann, D. & Lindemann, U. (2016a). Systematic Partitioning in Mechatronic Product Development by Modeling Structural Dependencies. In M. M. de Carvalho, S. D. Eppinger, M. Maurer, L. Becerril, & O. Z. de Souza (Hrsg.), *Proceedings of the 18th International DSM Conference. Sustainability in Modern Project Management* (S. 57–66).
- Chucholowski, N.; Lehmer, K.; Rebentisch, E. & Lindemann, U. (2016b). Synchronization in Product Development Projects: A Literature Study on Challenges and Practices. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković, N. Bojčetić, & S. Skec (Hrsg.), *International Design Conference - DESIGN 2016* (S. 1465–1474).
- Chucholowski, N. & Lindemann, U. (2015). An Initial Metamodel to Evaluate Potentials for Graphbased Analyses of Product Development Projects. In *Proceedings of the 17th International DSM Conference* (S. 75–88). München: Carl Hanser.
- Chucholowski, N.; Schöttl, F.; Bauer, W.; Schenkl, S. A.; Behncke, F. & Lindemann, U. (2015). A Process Taxonomy Model for Engineering Design Research. In Schabacker, M.: Gericke, K., N. Szélig, S. Vajna, & M. Schabacker (Hrsg.), *Modelling and Management of Engineering Processes. Proceedings of the 3rd International Conference 2013*. Heidelberg: Springer.
- Chucholowski, N.; Starke, P.; Moser, B. R.; Rebentisch, E. & Lindemann, U. (2016c). Characterizing and Measuring Activity Dependence in Engineering Projects. In *Proceedings of the Portland International Conference on Management of Engineering & Technology 2016*.
- Clark, H. H. (1996). *Using language*. Cambridge [England], New York: Cambridge University Press.
- Colfer, L. J. (2009). *Three Essays on the Structure of Technical Collaboration* (Dissertation). Harvard University, Cambridge, MA.
- Colfer, L. J. & Baldwin, C. (2016). *The Mirroring Hypothesis: Theory, Evidence and Exceptions* (Harvard Business School Working Paper No. Working Paper 16-124).
- Collins, S. T.; Yassine, A. A. & Borgatti, S. P. (2009). Evaluating product development systems using network analysis. *Systems Engineering*, 12(1), S. 55–68.
- Cortina, J. M. (1993). What is coefficient alpha? An examination of theory and applications. *Journal of Applied Psychology*, 78(1).

- Crabtree, R. A.; Fox, M. S. & Baid, N. K. (1997). Case studies of coordination activities and problems in collaborative design. *Research in Engineering Design*, 9(2), S. 70–84.
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3).
- Crowston, K.; Rubleske, J. & Howison, J. (2006). Coordination Theory: A Ten-Year Retrospective. In P. Zhang & D. F. Galletta (Hrsg.), *Advances in management information systems: v. 5. Human-computer Interaction and Management Information Systems // Human-computer interaction and management information systems. Foundations* (S. 120–138). Armonk, N.Y., London: M.E. Sharpe.
- Czichos, H. (2008). *Mechatronik: Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme* (2., aktualisierte und erw. Aufl.). *Studium*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- 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), S. 300–314.
- de Corbière, F. & Rowe, F. (2013). From Ideal Data Synchronization to Hybrid Forms of Interconnections: Architectures, Processes, and Data. *Journal of the Association for Information Systems*, 14(10). Abgerufen von <http://aisel.aisnet.org/jais/vol14/iss10/2>
- Demers, M. T. (2000). *Methoden zur dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen* (Dissertation).
- Deming, W. E. (1989). *Out of the Crisis*. Cambridge: MIT Press.
- Döring, P. & Gierens, H. (2009). Technische Kommunikation. In W. Pläßmann & D. Schulz (Hrsg.), *Praxis. Handbuch Elektrotechnik. Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker* (5. Aufl., S. 461–520). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Drawehn, J.; Kicherer, F.; Kopperger, D. & Zähringer, D. (2008). Einleitung. In D. Spath & A. Weisbecker (Hrsg.), *Business process management tools 2008. Eine evaluierende Marktstudie zu aktuellen Werkzeugen* (S. 7–23). Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.
- Dumke, R. (2003). *Software Engineering: Eine Einführung für Informatiker und Ingenieure: Systeme, Erfahrungen, Methoden, Tools* (4., überarbeitete und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Ebert, C. & Man, J. D. (2008). Effectively utilizing project, product and process knowledge. *Information and Software Technology*, 50(6), S. 579–594.
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2013). *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (5., überarb. und erw. Aufl.). München: Hanser.
- Eigner, M. (2014). Product Lifecycle Management (PLM). In M. Eigner, D. Roubanov, & R. Zafirov (Hrsg.), *Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung* (S. 267–300). Berlin, Germany: Springer Vieweg.
- Eigner, M.; Anderl, R. & Stark, R. (2012). Interdisziplinäre Produktentstehung. In R. Anderl, M. Eigner, U. Sandler, & R. Stark (Hrsg.), *acatech DISKUSSION. Smart Engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung* (S. 7–16). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

- Elezi, F.; Graebisch, M.; Hellenbrand, D. & Lindemann, U. (2011). Application of Multi-domain Matrix Waste Reduction Methodology in Mechatronic Product Development. In A. Chakrabarti (Hrsg.), *Research into design. Supporting sustainable product development*. Singapore: Research Publishing.
- Ellison, R. J.; Fisher, D. A.; Linger, R. C.; Lipson, H. F.; Longstaff, T. & Mead, N. R. (1997). *Survivable Network Systems: An Emerging Discipline* (No. CMU/SEI-97-TR-013).
- Eppinger, S. D. & Browning, T. R. (2012). *Design structure matrix methods and applications. Engineering systems*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Eppinger, S. D. & Salminen, V. (2001). Patterns of product development interactions. In *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED01)*.
- Espinosa, J.; Slaughter, S.; Kraut, R. & Herbsleb, J. (2007). Team Knowledge and Coordination in Geographically Distributed Software Development. *Journal of Management Information Systems*, 24(1), S. 135–169.
- Estefan, J. A. (2008). *Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies (INCOSE MBSE Initiative)*.
- Eversheim, W.; Bochtler, W. & Laufenberg, L. (1995). *Simultaneous engineering: Erfahrungen aus der industrie fur die industrie*. Berlin: Springer.
- Favre, J.-M. (2005). Foundations of Meta-Pyramids: Languages vs. Metamodels - Episode II: Story of Thotus the Baboon. In J. Bezivin & R. Heckel (Hrsg.), *Language Engineering for Model-Driven Software Development*. Schloss Dagstuhl, Germany: Internationales Begegnungs- und Forschungszentrum für Informatik (IBFI).
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.) (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8., vollst. überarb. Aufl. 2013). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Göpfert, J. & Tretow, G. (2013a). Technische Systeme. In J. Feldhusen & K.-H. Grote (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Kochan, D.; Beyer, C.; Vajna, S.; Lashin, G.; . . . Erk, P. (2013b). Die PEP-begleitenden Prozesse. In J. Feldhusen & K.-H. Grote (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8. Aufl., S. 25–236). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Festing, M. & Okech, J. (2008). Personenorientierte Koordination internationaler Aktivitäten in Entwicklungs-NGOs: Fallstudienanalyse und Entwicklung eines Bezugsrahmens. *Zeitschrift für Personalforschung*, 22(3), S. 249–271.
- Forsberg, K.; Mooz, H. & Cotterman, H. (2005). *Visualizing Project Management : Models and Frameworks for Mastering Complex Systems* (3rd edition). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Friedenthal, S.; Moore, A. & Steiner, R. (2008). *A practical guide to SysML: Systems Model Language*. Burlington, Mass.: Morgan Kaufmann.

- Gabler (2016). Definition "Koordination". Abgerufen von <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/koordination.html>
- Gaul, H.-D. (2001). *Verteilte Produktentwicklung - Perspektiven und Modell zur Optimierung* (Dissertation). Technische Universität München, München.
- Gausemeier, J. & Moehring, S. (2003). New Guideline VDI 2206: A Flexible Procedure Model for the Design of Mechatronic Systems. In *Proceedings of the 14th International Conference on Engineering Design, ICED'03*.
- Gebhart, N.; Kruse, M. & Krause, D. (2016). Gleichteile-, Modul- und Plattformstrategie. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Gehrke, M. (2005). *Entwurf mechatronischer Systeme auf Basis von Funktionshierarchien und Systemstrukturen* (Dissertation), Paderborn.
- Gericke, K. & Blessing, L. (2012). An analysis of design process models across disciplines. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković, & N. Bojčetić (Hrsg.), *International Design Conference - DESIGN 2012*.
- Gierhardt, H. (2002). *Global verteilte Produktentwicklungsprojekte: Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene* (1. Aufl.). *Produktentwicklung*. München: Verl. Dr. Hut; Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- Gokpinar, B.; Hopp, W. J. & Iravani, S. M. R. (2010). The Impact of Misalignment of Organizational Structure and Product Architecture on Quality in Complex Product Development. *Management Science*, 56(3), S. 468–484.
- Goldratt, E. M. (1997). *Critical chain*. Great Barrington, MA: North River Press.
- Göpfert, J. (2009). *Modulare Produktentwicklung: Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation ; Theorie, Methodik, Gestaltung* (2. Aufl.). *ID-Consult Wissen für die Praxis*. Norderstedt: Books on Demand.
- Hab, G. & Wagner, R. (2013). *Projektmanagement in der Automobilindustrie: Effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungskette* (4., überarb. und aktualisierte Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Haberfellner, R.; de Weck, O.; Fricke, E. & Vössner, S. (Hrsg.) (2012). *Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung* (12., völlig neu bearb. und erweiterte Aufl.). Zürich: Orell Füssli.
- Hartmann, S. (1999). *Project scheduling under limited resources: Models, methods, and applications. Lecture notes in economics and mathematical systems: Vol. 478*. Berlin, New York: Springer.
- Hauptman, O. & Hirji, K. K. (1999). Managing integration and coordination in cross-functional teams: An international study of Concurrent Engineering product development. *R&D Management*, 29(2), S. 179–191.
- Hellenbrand, D. (2013). *Transdisziplinäre Planung und Synchronisation mechatronischer Produktentwicklungsprozesse* (1. Aufl.). *Produktentwicklung*. München: Dr. Hut.

- Heller, M.; Jäger, D.; Krapp, C.-A.; Nagl, M.; Schleicher, A.; Westfechtel, B. & Würzberger, R. (2008). An Adaptive and Reactive Management System for Project Coordination. In M. Nagl & W. Marquardt (Hrsg.), *Lecture notes in computer science: Vol. 4970. Collaborative and distributed chemical engineering. From understanding to substantial design process support : results of the Improve Project*. Berlin: Springer-Verlag.
- Helms, B. & Kissel, M. (2016). Engineering Intelligence: Von der graphenbasierten Modellierung zur wissensbasierten Datenanalyse. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 979–1012). München: Carl Hanser Verlag.
- Höfferer, P. (2007). Achieving Business Process Model Interoperability Using Metamodels and Ontologies. In *ECIS 2007 Proceedings* (S. 1620–1631). Abgerufen von <http://aisel.aisnet.org/ecis2007/174>
- Huang, H. & Trauth, E. M. (2008). Cultural Influences on Temporal Separation and Coordination in Globally Distributed Software Development. In *Proceedings of the 29th International Conference on Information Systems*.
- Ickes, W. (1985). *Compatible and Incompatible Relationships*. Springer Series in Social Psychology. New York, NY: Springer New York.
- Isermann, R. (2000). Mechatronic systems: concepts and applications. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 22(1), S. 29–55.
- ISO (2012-06). *Fluidtechnik - Graphische Symbole und Schaltpläne - Teil 1: Graphische Symbole für konventionelle und datentechnische Anwendungen*. (ISO 1219-1:2012-06).
- ISO/IEC/IEEE (2015, 15. Mai). *Systems and software engineering - System life cycle processes*. (International Standard, 15288:2015).
- Jäger, D.; Schleicher, A. & Westfechtel, B. (2000). AHEAD: A Graph-Based System for Modeling and Managing Development Processes. In M. Nagl, A. Schürr, & M. Münch (Hrsg.): *Vol. 1779. Lecture notes in computer science, Applications of Graph Transformations with Industrial Relevance. International Workshop, AGTIVE'99* (S. 325–339). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Jakumeit, E.; Bomer, J. & Geiß, R. (2015). *The GrGen.NET User Manual*. Refers to GrGen.NET Release 4.4.2. Karlsruhe. Abgerufen von Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe (TH) Webseite: <http://www.info.uni-karlsruhe.de/software/grgen/GrGenNET-Manual.pdf>
- Jansen, S. (2007). *Eine Methodik zur modellbasierten Partitionierung mechatronischer Systeme*. Schriftenreihe / Institut für Konstruktionstechnik: Heft 07.3. Aachen: Shaker; Zugl. Bochum, Univ., Diss., 2006.
- Keller, G.; Nüttgens, M. & Scheer, A.-W. (1992). *Semantische Prozessmodellierung auf der Grundlage "Ereignisgesteuerter Prozessketten (EPK)"* (Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik (IWi), Universität des Saarlandes No. Heft 89). Saarbrücken.
- Keller, R.; Eckert, C. M. & Clarkson, P. J. (2006). Matrices or node-link diagrams: Which visual representation is better for visualising connectivity models? *Information Visualization*, 5(1), S. 62–76.

- Kern, E.-M. (2016). Verteilte Produktentwicklung. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 455–481). München: Carl Hanser Verlag.
- Kiggundu, M. N. (1981). Task Interdependence and the theory of job design. *Academy of Management Review*, 6(3).
- Kiggundu, M. N. (1983). Task Interdependence and job design: Test of a theory. *Organizational Behavior and Human Performance*, 31(2).
- Kim, K.; Park, J.-H. & Prescott, J. E. (2003). The global integration of business functions: a study of multinational businesses in integrated global industries. *Journal of International Business Studies*, 34, S. 327–344.
- Kissel, M. (2014). *Mustererkennung in komplexen Produktportfolios* (Dissertation).
- Kleedörfer, R. W. (1999). *Prozeß- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung. Reihe Konstruktionstechnik München: Bd. 29*. Aachen: Shaker; Zugl. Diss., München: TU, 1998.
- Kohn, A. (2014). *Entwicklung einer Wissensbasis für die Arbeit mit Produktmodellen*. München: Dr. Hut; Zugl. Diss., München: TU, 2014.
- Kolisch, R. (1995). *Project scheduling under resource constraints: Efficient heuristics for several problem classes. Production and logistics*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Krapp, C.-A.; Krüppel, S.; Schleicher, A. & Westfechtel, B. (2000). Graph-Based Models for Managing Development Processes, Resources, and Products. In H. Ehrig, G. Engels, H.-J. Krowski, & G. Rozenberg (Hrsg.): *Vol. 1764. Lecture notes in computer science, Theory and Application of Graph Transformations. 6th International Workshop, TAGT'98*.
- Kreimeyer, M. & Lindemann, U. (2011). *Complexity metrics in engineering design: Managing the structure of design processes*. New York: Springer.
- Kühne, T. (2006). Matters of (Meta-) Modeling. *Software & Systems Modeling*, 5(4), S. 369–385.
- Lang, C. & Madnick, S. E. (1993). *Managing Organizational Interfaces: The Information Technology Factor* (CISL Working Papers No. CISL WP# 93-04).
- Lauer, W. (2010). *Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in dynamischen Produktentwicklungsprozessen. Produktentwicklung: D109*. München: Dr. Hut; Zugl. München: TU, Diss. 2010.
- Laursen, B. & Jensen-Cambell, L. A. (1999). The Nature and Functions of Social Exchange in Adolescent Romantic Relationships. In W. Furman, B. B. Brown, & C. Feiring (Hrsg.), *Cambridge studies in social and emotional development. The development of romantic relationships in adolescence*. New York: Cambridge University Press.
- Lévárdy, V. (2006). *Model-based Framework for the Adaptive Development of Engineering Systems* (Diss.). Technische Universität München, München.
- Lientz, B. P. (2013). *Project management: A problem-based approach*. Houndmills, Basingstoke, New York, NY: Palgrave Macmillan.

- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Lindemann, U.; Maurer, M. & Braun, T. (2009). *Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design*. Berlin: Springer.
- Loch, C. H. & Terwiesch, C. (2005). Rush and Be Wrong or Wait and Be Late? A Model of Information in Collaborative Processes. *Production and Operations Management*, 14(3), S. 331–343.
- Malone, T. W. & Crowston, K. (1994). The interdisciplinary study of coordination. *ACM Computing Surveys*, 26(1), S. 87–119.
- Malone, T. W.; Crowston, K.; Lee, J.; Pentland, B.; Dellarocas, C.; Wyner, G.; . . . O'Donnell, E. (1999). Tools for Inventing Organizations: Toward a Handbook of Organizational Processes. *Management Science*, 45(3), S. 425–443.
- March, J. G. & Simon, H. A. (1958). *Organizations*. New York: Wiley.
- Marle, F. & Vidal, L.-A. (2016). *Managing Complex, High Risk Projects: A Guide to Basic and Advanced Project Management*. London: Springer.
- Martinez, J. I. & Jarillo, J. C. (1991). Coordination Demands of International Strategies. *Journal of International Business Studies*, 22(3), S. 429–444.
- Mayer, R. J.; Menzel, C. P.; Painter, M. K.; deWitte, P. S.; Blinn, T. & Perakath, B. (1995). *Information Integration for Concurrent Engineering (IICE): IDEF3 Process Description Capture Method Report*.
- Meyer, A. de; Loch, C. H. & Pich, M. T. (2002). Managing Project Uncertainty: From Variation to Chaos. *MIT Sloan Management Review*, January 2002, S. 60–67.
- Miller, G. A.; Galanter, E. & Pibram, C. (1973). *Strategien des Handelns*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Morelli, M. D.; Eppinger, S. D. & Gulati, R. K. (1995). Predicting technical communication in product development organizations. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 42(3), S. 215–222.
- Moser, B.; Grossmann, W. & Starke, P. (2015). Mechanisms of Dependence in Engineering Projects as Sociotechnical Systems. In *Proceedings of the 22nd ISPE Concurrent Engineering Conference (CE2015)*.
- Moser, B. & Halpin, J. (2009). Virtual Teams: The Design of Architecture and Coordination for Realistic Performance and Shared Awareness. In *PMI Global Congress Proceedings*.
- Moser, B.; Woodward, H. & Halpin, J. (2008). *A Pendulum Too Far: A Case for ACTION vs. DETAIL*. Originally published in 2008 PMI Global Congress Proceedings - Denver, Colorado, USA.

- Moser, B. R. & Wood, R. T. (2015). Design of Complex Programs as Sociotechnical Systems. In J. Stjepandić, N. Wognum, & W. J. Verhagen (Hrsg.), *Concurrent engineering in the 21st century. Foundations, developments and challenges* (S. 197–220). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-13776-6\_8
- Negele, H.; Finkel, S.; Schmidt, R. & Wenzel, S. (2006). Lessons Learned from Synchronizing Complex Systems Development within Automotive Industry. In *INCOSE 2006 - 16th Annual International Symposium Proceedings. System Engineering: Shining Light on the Tough Issues* (S. 621–635).
- Negele, H.; Fricke, E. & Igenbergs, E. (1997). ZOPH - A Systemic Approach to the Modeling of Product Development Systems. *INCOSE International Symposium*, 7(1), S. 266–273.
- Newman, M. E. J. (2003). The Structure and Function of Complex Networks. *SIAM Review*, 54(2), S. 167–256.
- NIST (1993, 21. Dezember). *Integration Definition for Function Modelling (IDEF0)*: National Institute of Standards and Technology.
- O'Donovan, B. D. (2004). *Modelling and Simulation of Engineering Design Processes* (PhD Thesis). University of Cambridge, Cambridge [England].
- O'Donovan, B. D.; Eckert, C.; Clarkson, P. J. & Browning, T. R. (2005). Design planning and modeling. In P. J. Clarkson & C. Eckert (Hrsg.), *Design process improvement. A review of current practice*. London: Springer.
- OMG (2011). *Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0*. Abgerufen von Object Management Group, Inc. Webseite: <http://www.omg.org/spec/BPMN/2.0>
- Oosterman, B. (2001). *Improving product development projects by matching product architecture and organization. Theses on systems, organisation and management*. Capelle a/d IJssel: Labyrinth Publication; Zugl. Groningen: Univ., Diss. 2001.
- Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2007). *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung* (7. Aufl.). Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer.
- Parraguez, P. (2015). *A networked perspective on the engineering design process: at the intersection of process and organisation architectures* (PhD thesis). Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby.
- Parraguez, P.; Eppinger, S. D. & Maier, A. M. (2014). Evolution of Information Control and Centralisation Through Stages of Complex Engineering Design Projects. In D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković, & N. Bojčetić (Hrsg.), *International Design Conference - DESIGN 2014*.
- Parraguez, P.; Eppinger, S. D. & Maier, A. M. (2015). Information Flow Through Stages of Complex Engineering Design Projects: A Dynamic Network Analysis Approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 62(4), S. 604–617.

- Parraguez, P.; Eppinger, S. & Maier, A. (2016). Characterizing Design Process Interfaces as Organization Networks: Insights for Engineering Systems Management. *Systems Engineering*, 19(2), S. 158–173.
- Patzak, G. & Rattay, G. (2009). *Projektmanagement: Leitfaden zum Management von Projekten, Projektportfolios, Programmen und projektorientierten Unternehmen* (5., wesentlich erw. und aktualisierte Aufl.). *Fachbuch Wirtschaft*. Wien: Linde.
- Pimmler, T. U. & Eppinger, S. D. (1994). Integration Analysis of Product Decompositions. In *ASME Design Theory and Methodology Conference*.
- PMI (2013). *A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide)* (5th ed). Newtown Square, Pa.: Project Management Institute. Abgerufen von [http%3A//www.worldcat.org/oclc/843183066](http://www.worldcat.org/oclc/843183066)
- PMI (2016). *The High cost of Low Performance* (PMI's Pulse of the Profession). Abgerufen von Project Management Institute Webseite: <http://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2016.pdf>
- Pohl, K. (2010). *Requirements engineering: Fundamentals principles, and techniques*. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer.
- Ponn, J. & Lindemann, U. (2011). *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen* (2nd Aufl.). Heidelberg: Springer.
- Pritsker, A. A. B. (1966). *GERT: Graphical Evaluation and Review Technique*. RM-4973-NASA: National Aeronautics and Space Administration under Contract No. NASr-21.
- Qian, F. & Shensheng, Z. (2002). Product Development Process Management System Based on P\_PROCE Model. *Concurrent Engineering*, 10(3).
- Rauhut, M. (2011). *Synchronisation von Entwicklungsprozessen durch Taktung. Ergebnisse aus der Produktionstechnik: Vol. 2011,14*. Aachen: Apprimus-Verlag.
- Ringel, M.; Taylor, A. & Zablit, H. (2015). *Most Innovative Companies 2015: Four Factors That Differentiate Leaders*. Abgerufen von <https://media-publications.bcg.com/MIC/BCG-Most-Innovative-Companies-2015.pdf>
- Roelofsen, J. (2011). *Situationsspezifische Planung von Produktentwicklungsprozessen. Produktentwicklung: D111*. München: Dr. Hut; Zugl. München: TU, Diss. 2011.
- Ropohl, G. (1975). *Systemtechnik - Grundlagen und Anwendung*. München: Hanser.
- Ross, D. T. (1977). Structured Analysis (SA): A Language for Communicating Ideas. *IEEE Transactions on Software Engineering*. (1), S. 16–34.
- Ross, D. T. (1985). Applications and Extensions of SADT. *Computer*, 18(4), S. 25–34.
- Salas, E. (2013). *Developing and Enhancing High-Performance Teams: Evidence-Based Practices and Recommendations: (J-B SIOP Professional Practice Series)*: Wiley & Sons, Incorporated, John.

- Schady, R. (2008). *Methode und Anwendungen einer wissensorientierten Fabrikmodellierung* (Dissertation). Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg.
- Scheer, A.-W. (2000). *ARIS - business process modeling* (3rd ed.). Berlin: Springer.
- Schelle, H.; Ottmann, R. & Pfeiffer, A. (2008). *ProjektManager* (3. Auflage). Nürnberg: GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement.
- Scherff, D. (2013, 13. Januar). Berliner Flughafen: Die geheime Mängelliste. *Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung*. Abgerufen von <http://www.faz.net/aktuell/politik/inland/flughafen-berlin-brandenburg/berliner-flughafen-die-geheime-maengelliste-12023659.html>
- Schertler, W. (2009). *Unternehmensorganisation: Lehrbuch der Organisation und strategischen Unternehmensführung* (8. Aufl.). Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Oldenbourg.
- Schlick, C. M.; Duckwitz, S. & Schneider, S. (2013). Project dynamics and emergent complexity. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 19(4), S. 480–515.
- Schmelzer, H. J. & Sesselmann, W. (2008). *Geschäftsprozessmanagement in der Praxis: Kunden zufrieden stellen - Produktivität steigern - Wert erhöhen ; [das Standardwerk]* (6., vollst. überarb. und erw. Aufl.). München: Hanser.
- Schoeneberg, K.-P. (2014). Komplexität - Einführung in die Komplexitätsforschung und Herausforderungen für die Praxis. In K.-P. Schoeneberg (Hrsg.), *SpringerLink : Bücher. Komplexitätsmanagement in Unternehmen. Herausforderungen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Schuh & Günther (2005). *Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools* (2., überarb. und erw. Aufl.). München, Wien: Hanser.
- Schuh, G. (2013). *Lean Innovation. VDI-Buch*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Schulte-Zurhausen, M. (2002). *Organisation* (3., überarb. Aufl.). München: Vahlen.
- Schulze, S.-O. (2016). Systems Engineering. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 153–184). München: Carl Hanser Verlag.
- Sim, S. K. & Duffy, A. H. B. (2003). Towards an ontology of generic engineering design activities. *Research in Engineering Design*, 14(4), S. 200–223.
- Sosa, M. E. (2008). A structured approach to predicting and managing technical interactions in software development. *Research in Engineering Design*, 19(1), S. 47–70.
- Sosa, M. E.; Eppinger, S. D. & Rowles, C. M. (2003). Identifying Modular and Integrative Systems and Their Impact on Design Team Interactions. *Journal of Mechanical Design*, 125(2), S. 240.
- Sosa, M. E.; Eppinger, S. D. & Rowles, C. M. (2004). The Misalignment of Product Architecture and Organizational Structure in Complex Product Development. *Management Science*, 50(12), S. 1674–1689.

- Sosa, M. E.; Gargiulo, M. & Rowles, C. M. (2007). *Component Connectivity, Team Network Structure and the Attention to Technical Interfaces in Complex Product Development* (Faculty & Research Working Paper).
- Spafford, G. (2003). The Magic and Danger of Misunderstanding. Abgerufen von <http://www.projectmanagement.com/articles/165895/The-Magic-and-Danger-of-Misunderstanding>
- Spath, D. & Dangelmaier, M. (2016). Produktentwicklung Quo Vadis. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer.
- Stetter, R. & Pulm, U. (2009). Problems and Chances in Industrial Mechatronic Product Development. In *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design ICED09* (5-97 - 5-108).
- Stuffer, R. (1994). *Planung und Steuerung der integrierten Produktentwicklung. Konstruktionstechnik München: Bd. 14*. München, Wien: Hanser; Zugl. Diss., München: TU, 1993.
- Swenson, K. D. (2010). *Mastering the unpredictable: How adaptive case management will revolutionize the way that knowledge workers get things done*. Tampa, Fla.: Meghan-Kiffer Press.
- Tang, J. C. (1991). Findings from observational studies of collaborative work. *International Journal of Man-Machine Studies*, 34(2), S. 143–160.
- Thompson, J. D. (1967). *Organizations in action. Social science bases of administrative theory*. New York: McGraw-Hill.
- Tittmann, P. (2003). *Graphentheorie: Eine anwendungsorientierte Einführung*. München: Hanser.
- Trisl, C.; Karcher, A.; Klenk, H. & Haubach-Lippmann, C. (2013). Towards a Framework for Synchronization of Systems- and Mechanical/Electrical Engineering processes on multiple dimensions. In J. Stjepandić, G. Rock, & C. Bil (Hrsg.), *Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment. Proceedings of the 19th ISPE International Conference on Concurrent Engineering* (S. 1021–1032). London: Springer.
- Vajna, S.; Weber, C.; Bley, H. & Zeman, K. (2009). *CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung* (2., völlig neu bearb. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- van Beek, T. J.; Erden, M. S. & Tomiyama, T. (2010). Modular design of mechatronic systems with function modeling. *Mechatronics*, 20(8), S. 850–863.
- VDI (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte - VDI 2221*. (2221).
- VDI (2004). *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme - VDI 2206*. (2206).
- Versteegen, G.; Heßeler, A.; Hood, C.; Missling, C. & Stücka, R. (2004). *Anforderungsmanagement: Formale Prozesse, Praxiserfahrungen, Einführungsstrategien und Toolauswahl*. Xpert.press. Berlin, Heidelberg: Springer.

- Vidal, L. & Marle, F. (2008). Understanding project complexity: Implications on project management. *Kybernetes*, 37(8), S. 1094–1110.
- Vogel-Heuser, B. & Kernschmidt, K. (2014). Modellbasiertes disziplinübergreifendes Management von IT-Zyklen in Innovationsprozessen. In B. Vogel-Heuser, U. Lindemann, & G. Reinhart (Hrsg.), *Innovationsprozesse zyklensorientiert managen. Verzahnte Entwicklung von Produkt-Service Systemen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Walden, D. D.; Roedler, G. J.; Forsberg, K.; Hamelin, R. D. & Shortell, T. M. (Hrsg.) (2015). *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities* (4th edition). Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Wallace, J. (2016, 29. September). Update on problems joining 787 fuselage sections. *Boeing and Aerospace News*. Abgerufen von <http://blog.seattlepi.com/aerospace/2007/06/12/update-on-problems-joining-787-fuselage-sections/>
- Wasserman, S. & Faust, K. (1994). *Social Network Analysis: Methods and Applications. Structural analysis in the social sciences: Vol. 8*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Wenzel, S. (2003). *Organisation und Methodenauswahl in der Produktentwicklung. Systems Engineering*. München: Utz, Wiss.
- Westfechtel, B. (2001). Ein graphbasiertes Managementsystem für dynamische Entwicklungsprozesse. *Informatik Forsch. und Entw.* (16), S. 125–144.
- Worren, N. A. M. (2012). *Organisation design: Re-defining complex systems*. Harlow, England, New York: Pearson.
- Yang, Q.; Yao, T.; Lu, T. & Zhang, B. (2014). An Overlapping-Based Design Structure Matrix for Measuring Interaction Strength and Clustering Analysis in Product Development Project. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 61(1), S. 159–170.
- Yassine, A.; Whitney, D. E.; Daleiden, S. & Lavine, J. (2003). Connectivity maps: modeling and analysing relationships in product development processes. *Journal of Engineering Design*, 14(4), S. 377–394.
- Zhang, K.; Chen, J. & Xiong, G. (1999). Product Development Process Modeling. *Tsinghua Science and Technology*, 4(2), S. 1386–1391.
- Zhong, P.; Liu, D.; Meng, X. & Liu, M. (2004). Methodology of Knowledge-based Process Modeling for Concurrent Product Development. In *Proceedings of the 8th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CACWD 2004*.
- Zielinski, D. (2009). *Synchronisationsmanagement in der Produktentwicklung* (Unveröffentlichte Diplomarbeit). Technische Universität München.
- Zohm, F. (2004). *Management von Diskontinuitäten: Das Beispiel der Mechatronik in der Automobilzulieferindustrie* (1. Aufl.). Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.; Zugl. Diss., RXTA Aachen, 2003.

## 9. Anhang

### 9.1 Studienarbeitsverzeichnis

Im Rahmen des Dissertationsprojekts wurden vom Autor acht relevante Studienarbeiten sowie eine wissenschaftliche Hilfskraft sowohl inhaltlich als auch forschungsmethodisch intensiv betreut. Die Themenstellungen wurden vom Autor formuliert und die inhaltliche Ausrichtung wurde in regelmäßigen Abstimmungstreffen diskutiert, wodurch Ideen und Vorarbeiten des Autors in die Ausarbeitungen mit einfließen. Tabelle 9-1 zeigt auf, zu welchen Kapiteln ausgewählte Teile der Arbeiten beigetragen haben. Die Auflistung beinhaltet zusätzlich ein Studienarbeitsprojekt (PE-Spath 2016), das von einem Lehrstuhl-Kollegen (Dipl.-Ing. Christoph Hollauer) betreut wurde. In der Fallstudie TUfast wird auf Teilergebnisse einer Fragebogenstudie zurückgegriffen, die im Rahmen dieses Studienarbeitsprojekts durchgeführt wurde.

*Tabelle 9-1 Relevante Studienarbeitsprojekte für diese Arbeit.*

| Referenz           | Name               | Titel  | Art der Arbeit | Jahr          | Relevante Kapitel           |
|--------------------|--------------------|--|----------------|---------------|-----------------------------|
| PE-Hartmann 2016   | Hartmann, Linda    | Graphenbasierte Modellierung und Analyse von Projektzusammenhängen in der Entwicklung von Finanztrainings                              | MA             | 2015/<br>2016 | 5.2                         |
| PE-Kriegler 2016   | Kriegler, Johannes | -  | Hiwi           | 2016          | 2.2.3                       |
| PE-Lehmer 2015     | Lehmer, Katharina  | Situational Support of systematic Synchronization during Product Development   | MA             | 2015          | 3.2.3, 4.3                  |
| PE-Przybilla 2016  | Przybilla, Leonard | Applying Network Theory to the Analysis of Coordination in Design Engineering Project Systems  | MA             | 2016          | 5.1, 5.3.3, 5.3.4, 5.5, 6.3 |
| PE-Ralsler 2016    | Ralsler, Frederic  | Modellbasierte Koordinationsplanung in komplexen Entwicklungsprojekten an einem industriellen Fallbeispiel (Arbeitstitel)              | MA             | 2016          | 5.2                         |
| PE-Spath 2016      | Spath, Tobias      | Kontextorientierte Entwicklungsprozesse am Beispiel TUfast (Arbeitstitel)  | SA             | 2016          | 6.2                         |
| PE-Starke 2015     | Starke, Phillip    | A New Approach to Understanding and Measuring Task Interdependence   | MA             | 2014/<br>2015 | 4.2                         |
| PE-Steininger 2016 | Steininger, Sarah  | Erstellung eines Prozessleitfadens für das Fahrerassistenz-Projektmanagement und Kategorisierung der zu koordinierenden Abhängigkeiten | BA             | 2016          | 4.1                         |
| PE-Vigne 2014      | Vigne, Jérôme      | Development of a Metamodel for Efficient Product Design Process Modeling   | MA             | 2014          | 5.2                         |
| PE-Vollmann 2016   | Vollmann, Tobias   | Modellbasierte Planung und Koordination komplexer Entwicklungsprojekte am Beispiel des TUfast Urban Concept-Projekts                   | MA             | 2016          | 5.2, 6.2                    |

SA: Semesterarbeit; BA: Bachelorarbeit; MA: Masterarbeit; Hiwi: Wissenschaftliche/studentische Hilfskraft

## 9.2 Überblick über Expertengespräche

Neben regelmäßigen Gesprächen mit Kolleginnen und Kollegen im näheren Umfeld und inhaltlichen Abstimmungen mit dem betreuenden Professor dieser Arbeit, wurden diverse Gespräche mit Experten geführt, die zur Formung der Themenstellung und der erarbeiteten Inhalte beigetragen haben. In den Gesprächen wurden vorhandene Forschungsergebnisse diskutiert und Gesprächspartner aus der Industrie gaben wertvolle Einblicke in die industrielle Praxis. Die Gesprächspartner und jeweiligen Gesprächstermine sind in Tabelle 9-2 chronologisch aufgeführt.

*Tabelle 9-2 Auflistung der durchgeführten Expertengespräche.*

| <b>Firma, Forschungseinrichtung</b>  | <b>Name bzw. Abteilung/Position</b>   | <b>Datum, Zeitraum</b>                              |
|--|---|---|
| collaborationFactory   | Dr.-Ing. Rupert Stuffer, Geschäftsführer  | 15.07.2014<br>12.07.2016                            |
| BMW Group  | Prozessmanager  | 18.09.2014  |
| BMW Group  | Teamleitung Prozess- und Projektmanagement im Bereich Fahrdynamik und Fahrerassistenz | 08.10.2014  |
| Neeley School of Business,<br>Texas Christian University, USA                            | Prof. Tyson Browning  | 15.07.2015<br>26.07.2016                            |
| Hilti  | Projektleiter   | 10.06.2015<br>17.06.2015                            |
| Sociotechnical Systems Research<br>Center, Massachusetts Institute of<br>Technology, USA | Dr. Eric Rebentisch<br>Dr. Bryan Moser  | 15.11.2015 bis 19.12.2015<br>Wöchentliche Gespräche |

### 9.3 Ergänzende Informationen zum illustrativen Beispiel LEGO Bagger

In Tabelle 9-3 wird deutlich, dass nicht jede Funktion genau einer übergeordneten Funktion zugeteilt ist. Diese Funktionen sind Teilfunktionen, die an mehreren anderen Funktionen beteiligt sind. Die gewählte Dekomposition in dem Beispiel ist folglich nicht sauber, hat jedoch keine Auswirkungen auf die Betrachtungen in dieser Arbeit.

*Tabelle 9-3 Auflistung der Funktionen und der Funktionshierarchie im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.*

| <b>Function</b>  | <b>Name</b>       | <b>Parent</b>                                     |
|------------------|-------------------|---|
| LegoFunction #1  | Excavate          |   |
| LegoFunction #2  | Connect to Object | LegoFunction #1                                   |
| LegoFunction #3  | Lift Object       | LegoFunction #1                                   |
| LegoFunction #4  | Move Object       | LegoFunction #1                                   |
| LegoFunction #5  | Lower Object      | LegoFunction #1                                   |
| LegoFunction #6  | Release Object    | LegoFunction #1                                   |
| LegoFunction #7  | Convert Signal    | LegoFunction #1                                   |
| LegoFunction #8  | Convert Energy    | LegoFunction #1                                   |
| LegoFunction #9  | Store Energy      | LegoFunction #1                                   |
| LegoFunction #10 | Protect Operator  | LegoFunction #1                                   |
| LegoFunction #11 | Move Excavator    | LegoFunction #1                                   |
| LegoFunction #12 | Close Gripper     | LegoFunction #2                                   |
| LegoFunction #13 | Open Gripper      | LegoFunction #6                                   |
| LegoFunction #14 | Move Arm          | LegoFunction #3, LegoFunction #4, LegoFunction #5 |
| LegoFunction #15 | Move Whole Arm    | LegoFunction #14                                  |
| LegoFunction #16 | Move Part of Arm  | LegoFunction #14                                  |
| LegoFunction #17 | Rotate Body       | LegoFunction #4, LegoFunction #11                 |
| LegoFunction #18 | Move Body         | LegoFunction #4, LegoFunction #11                 |
| LegoFunction #19 | Move Left Tracks  | LegoFunction #17, LegoFunction #18                |
| LegoFunction #20 | Move Right Tracks | LegoFunction #17, LegoFunction #18                |
| LegoFunction #21 | Structural        | LegoFunction #1                                   |

Tabelle 9-4 Auflistung der Module und der Komponentenhierarchie im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

| Module         | Name                          | Parent                 |
|----------------|-------------------------------|------------------------|
| LegoModule #1  | Arm 1: Gearing                | LegoModule #27         |
| LegoModule #2  | Arm 2: Gearing                | LegoModule #27         |
| LegoModule #3  | Arm 3: Gearing                | LegoModule #27         |
| LegoModule #4  | Gripper: Gearing              | LegoModule #27         |
| LegoModule #5  | Arm 1: Hydraulics             | LegoModule #27         |
| LegoModule #6  | Arm 2: Hydraulics             | LegoModule #27         |
| LegoModule #7  | Gripper: Hydraulics           | LegoModule #27         |
| LegoModule #8  | Arm 1: Structure              | LegoModule #27         |
| LegoModule #9  | Arm 1: Bottom structure       | LegoModule #27         |
| LegoModule #10 | Arm 1: Top structure          | LegoModule #27         |
| LegoModule #11 | Arm 2: Structure              | LegoModule #27         |
| LegoModule #12 | Arm 2: Top structure          | LegoModule #27         |
| LegoModule #13 | Arm 3: Structure              | LegoModule #27         |
| LegoModule #14 | Gripper. Structure            | LegoModule #27         |
| LegoModule #15 | Body: Gearing                 | LegoModule #28         |
| LegoModule #16 | Body: Cabin structure         | LegoModule #28         |
| LegoModule #17 | Body: Central structure       | LegoModule #28         |
| LegoModule #18 | Body: Left structure          | LegoModule #28         |
| LegoModule #19 | Body: Right structure         | LegoModule #28         |
| LegoModule #20 | Body: Rotation                | LegoModule #28         |
| LegoModule #21 | Drivetrain: Left chain        | LegoModule #29         |
| LegoModule #22 | Drivetrain: Right chain       | LegoModule #29         |
| LegoModule #23 | Drivetrain: Chain tread       | LegoModule #29         |
| LegoModule #24 | Drivetrain: Central structure | LegoModule #29         |
| LegoModule #25 | Drivetrain: Left structure    | LegoModule #29         |
| LegoModule #26 | Drivetrain: Right structure   | LegoModule #29         |
| LegoModule #27 | Arm                           | Product LEGO Excavator |
| LegoModule #28 | Body                          | Product LEGO Excavator |
| LegoModule #29 | Drivetrain                    | Product LEGO Excavator |

Tabelle 9-5 Auflistung der einzelnen Bauteile im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

| Part          | Name                           | Part          | Name                           |
|---------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|
| LegoPart #17  | Catch                          | LegoPart #474 | Halfbeam Curve 3X5             |
| LegoPart #19  | Technic Beam 5M                | LegoPart #481 | 2M Cross Axle W. Groove        |
| LegoPart #29  | Connector Peg                  | LegoPart #482 | Technic 6M Half Beam           |
| LegoPart #44  | Technic 15M Beam               | LegoPart #486 | Connector Peg W. Knob          |
| LegoPart #50  | Technic 7M Beam                | LegoPart #487 | Technic Lever 3X3M, 90°        |
| LegoPart #52  | Technic Ang. Beam 3X5 90 Deg   | LegoPart #491 | Double Angular Beam 3X7 45 °   |
| LegoPart #106 | 1/2 Bush                       | LegoPart #493 | Cross Axle 4M with End Stop    |
| LegoPart #108 | Sprocket, ø40,7                | LegoPart #494 | Technic 7M Beam                |
| LegoPart #114 | Technic 9M Beam                | LegoPart #498 | Tube W/Double Ø4.85            |
| LegoPart #118 | Beam 4X2 W. 90 Hole Ø 4.8      | LegoPart #501 | Beam 3 M. W/4 Snaps            |
| LegoPart #124 | Beam Frame 5X7 Ø 4.85          | LegoPart #508 | Double Cross Block             |
| LegoPart #131 | Beam R. Frame 5X11 Ø4.85       | LegoPart #512 | 2M Fric. Snap W/Cross Hole     |
| LegoPart #160 | Technic 3M Beam                | LegoPart #516 | Double Angular Beam 3X7 45 °   |
| LegoPart #183 | Angular beam 90degr. w.4 snaps | LegoPart #520 | Angle Element, 0 Degrees [1]   |
| LegoPart #185 | Cross Axle 8M with End Stop    | LegoPart #524 | Angle Element, 180 Degrees [2] |
| LegoPart #187 | Gear Wheel Z16                 | LegoPart #532 | Technic 15M Beam               |
| LegoPart #206 | Cross Axle, Extension M/3 Ribs | LegoPart #535 | Technic Ang. Beam 3X5 90 Deg   |
| LegoPart #212 | Gear Wheel Z16-Ø4.9            | LegoPart #543 | Technic Ang. Beam 3X5 90 Deg   |
| LegoPart #213 | Driving Ring                   | LegoPart #546 | Technic Ang. Beam 4X2 90 Deg   |
| LegoPart #218 | Cross Block 2X4                | LegoPart #556 | Technic Ang. Beam 3X5 90 Deg   |
| LegoPart #219 | Double Conical Wheel Z20 1M    | LegoPart #557 | Technic 13M Beam               |
| LegoPart #226 | Cross Axle M/STOP 4M           | LegoPart #558 | Technic 11M Beam               |
| LegoPart #230 | Double Conical Wheel Z12 1M    | LegoPart #559 | Shell 3x11x2 Ø 4.85 08         |
| LegoPart #242 | Technic Change-Over Catch      | LegoPart #572 | Round Plate 1X1 - Tr.          |
| LegoPart #249 | Bush For Cross Axle            | LegoPart #575 | Technic 7M Beam                |
| LegoPart #278 | Left Panel 3X7                 | LegoPart #576 | Outer Cable 48MM               |
| LegoPart #285 | Technic 9M Beam                | LegoPart #577 | Angle Element, 90 Degrees [2]  |
| LegoPart #287 | Crossaxle 3M with Knob         | LegoPart #578 | Outer Cable 72MM               |
| LegoPart #299 | Cross Axle 9M                  | LegoPart #581 | Connector Peg W. Friction      |
| LegoPart #306 | Turntable Ø4.85                | LegoPart #589 | Technic Cross Block 2X1        |
| LegoPart #336 | Technic Ang. Beam 4X2 90 Deg   | LegoPart #596 | Linear Actuator 7-9 M          |
| LegoPart #337 | Technic Beam 5M                | LegoPart #598 | Conical Wheel Z12              |
| LegoPart #340 | Cardan Cup with Cross Axle 2M  | LegoPart #600 | Bush For Cross Axle            |
| LegoPart #341 | Beam 1M W. 2 Cross Axles 90°   | LegoPart #601 | Cone Wheel Z20 Ø4.85           |
| LegoPart #343 | Lt Cardan Ball                 | LegoPart #606 | Technic Cross Block/Fork 2X2   |
| LegoPart #357 | Cross Axle 10M                 | LegoPart #608 | Grab Element                   |
| LegoPart #397 | Module Bush                    | LegoPart #610 | Vert. Beam 90 Degr.            |
| LegoPart #405 | Linear Actuator 10-15 M        | LegoPart #612 | Technic Lever 3M               |
| LegoPart #406 | Block 3X4X2                    | LegoPart #618 | Cross Axle 5M                  |
| LegoPart #412 | Propeller Shaft                | LegoPart #619 | Cross Block/Form 2X2X2         |
| LegoPart #429 | Plastic Motor, Crank/Cross     | LegoPart #621 | 1 1/2 M Connecting Bush        |
| LegoPart #432 | Cross Axle 5,5 with Stop 1M.   | LegoPart #624 | Technic 5M Half Beam           |
| LegoPart #433 | Cross Axle 7M                  | LegoPart #630 | Cross Axle 3M                  |
| LegoPart #446 | Double Bush 3M Ø4.9            | LegoPart #631 | Beam 1X2 W/Cross And Hole      |
| LegoPart #459 | Technic 3M Beam                | LegoPart #632 | Connector Peg W. Friction 3M   |
| LegoPart #462 | Cross Block 3M                 | LegoPart #634 | Catch W. Cross Hole            |
| LegoPart #464 | Cross Axle, Extension, 2M      | LegoPart #638 | 3M Connector Peg               |
| LegoPart #465 | Cross Axle 8M                  | LegoPart #646 | Technic Beam 5M                |
| LegoPart #466 | Cross Axle 4M                  | LegoPart #647 | Triangle                       |
| LegoPart #469 | Hub Ø11,2 X 7,84               | LegoPart #648 | Conn.Bush W.Fric./Crossale     |
| LegoPart #472 | Technic Lever 3M               | LegoPart #650 | Track Element, 5x1,5           |

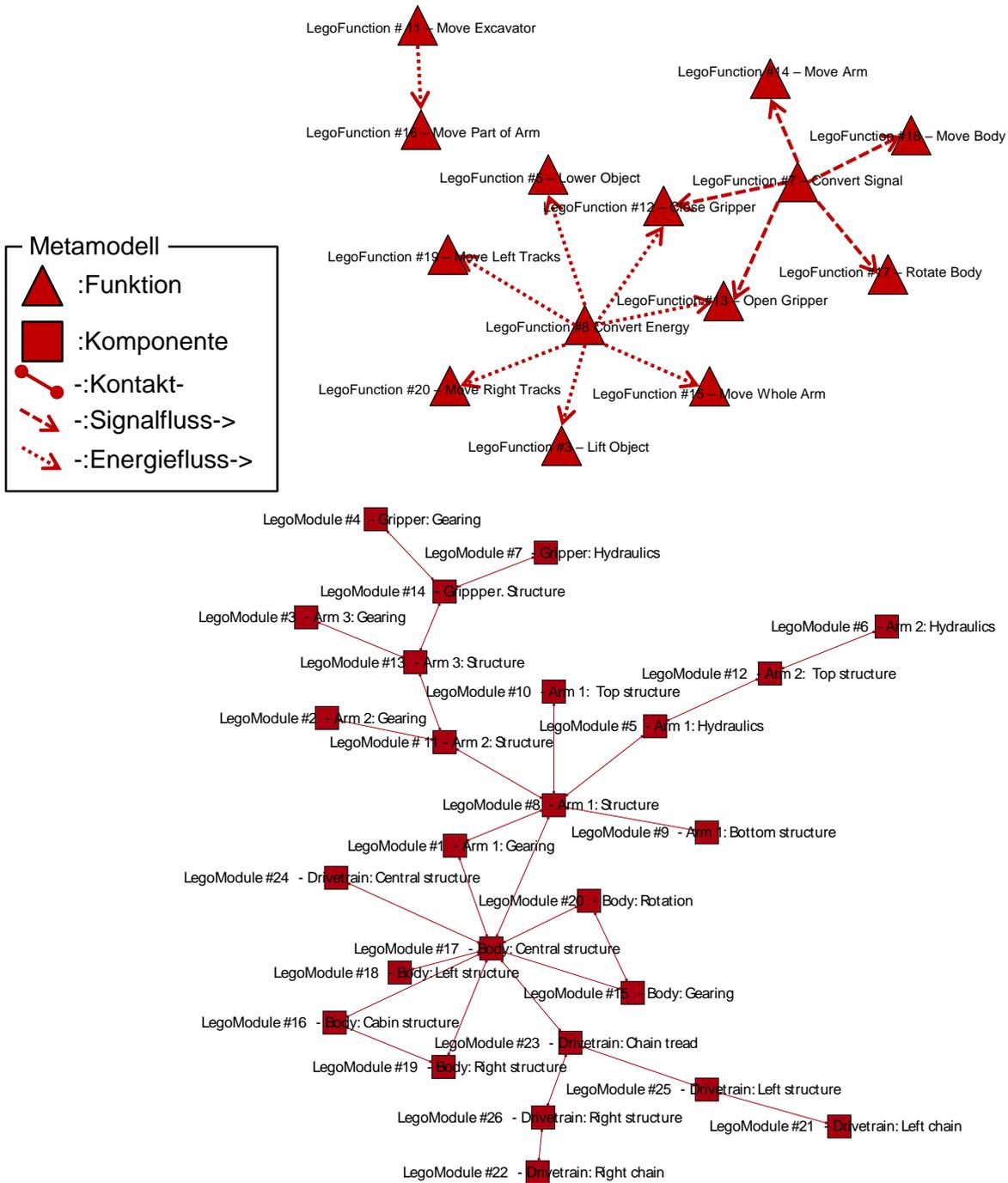


Abbildung 9-1 Ergänzte Signal- und Energieflüsse auf Funktionsebene und Kontaktbedingungen auf Komponentenebene im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

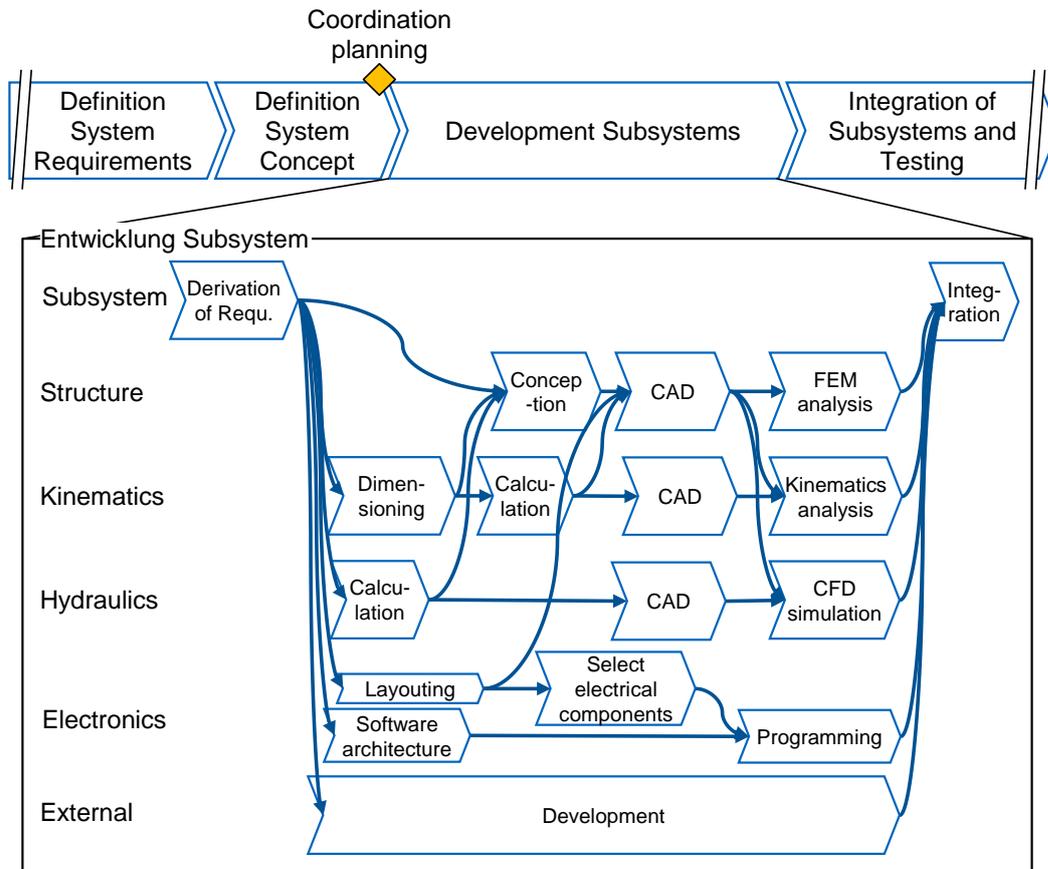


Abbildung 9-2 Fiktiver Referenzprozess im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

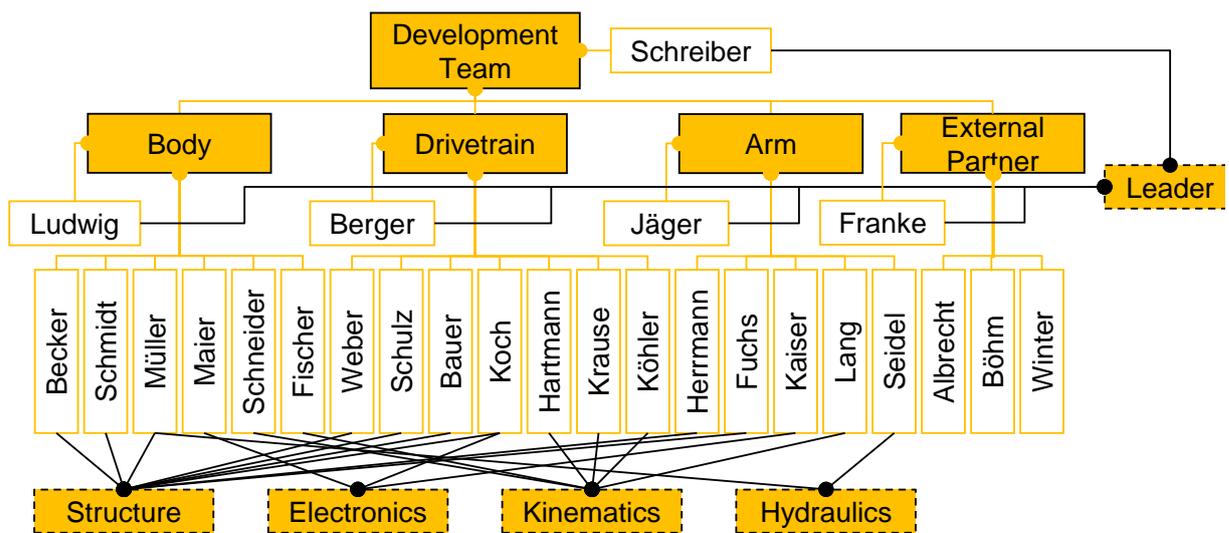


Abbildung 9-3 Fiktive Entwicklungsorganisation im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

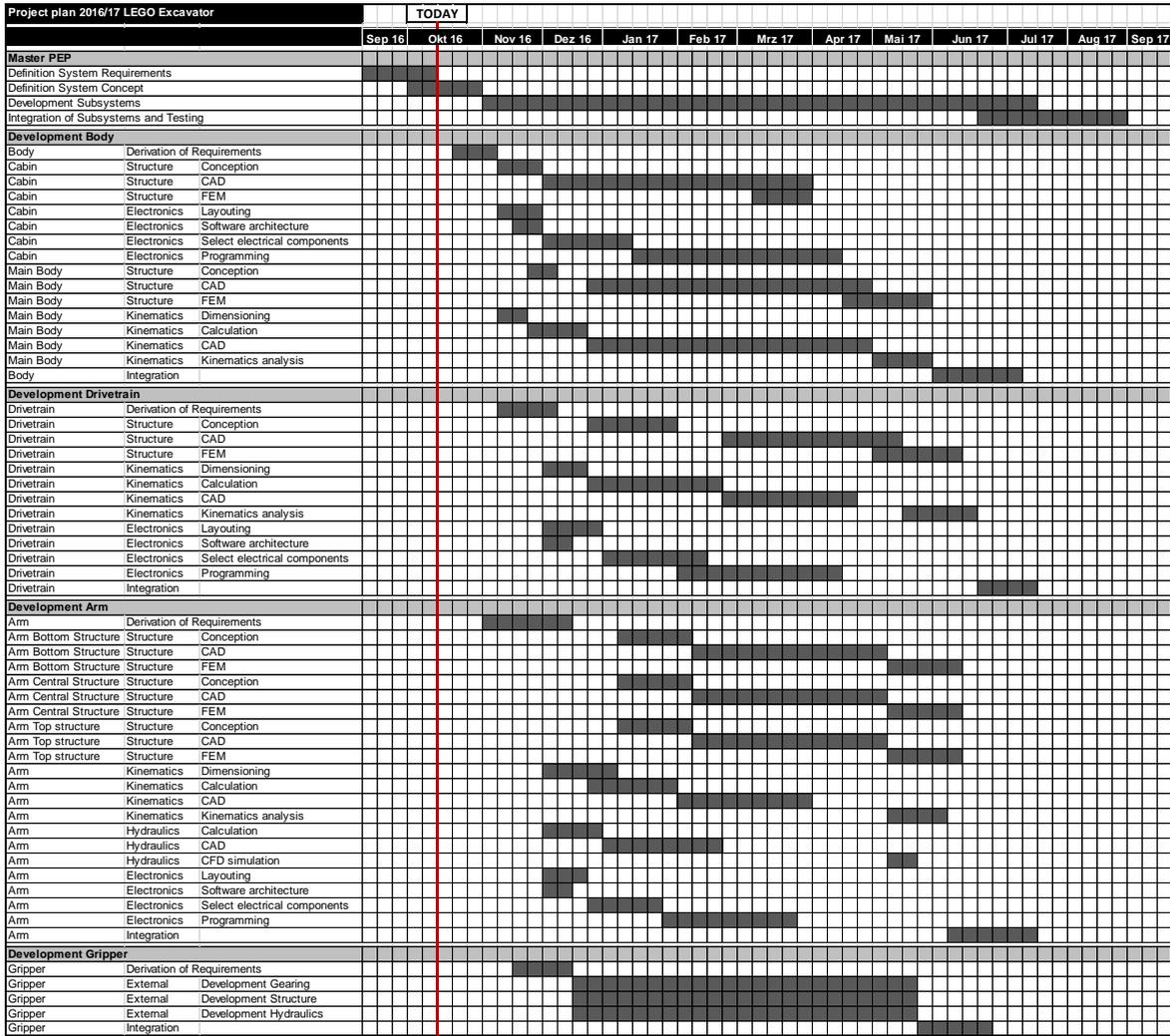


Abbildung 9-4 Fiktiver Projektzeitplan im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

| Entwicklungsprozessschritte                             | Personen  |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
|---|-----------|--------|--------|---------|--------|-------|-----------|---------|--------|-------|--------|-------|------|----------|--------|--------|-------|----------|-------|--------|------|--------|-------|----------|------|--------|--|
|   | Schreiber | Ludwig | Becker | Schmidt | Müller | Maier | Schneider | Fischer | Berger | Weber | Schulz | Bauer | Koch | Hartmann | Krause | Köhler | Jäger | Herrmann | Fuchs | Kaiser | Lang | Seidel | Frank | Albrecht | Böhm | Winter |  |
| Master PEP  |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Definition System Requirements                          | A         | E      |        |         |        |       |           |         | F      |       |        |       |      |          |        |        | E     |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Definition System Concept                               | A         | E      |        |         |        |       |           |         | F      |       |        |       |      |          |        |        | E     |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Development Subsystems                                  |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Integration of Subsystems and Testing                   | A         | E      |        |         |        |       |           |         | E      |       |        |       |      |          |        |        | E     |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Development Body  |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Body - Derivation of Requirements                       |           | E      |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Cabin - Structure - Conception                          |           |        | E      |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Cabin - Structure - CAD                                 |           |        |        | E       |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Cabin - Structure - FEM                                 |           |        |        | E       |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Cabin - Electronics - Layouting                         |           |        |        |         |        | E     |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Cabin - Electronics - Software architecture             |           |        |        |         |        |       | E         |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Cabin - Electronics - Select electrical components      |           |        |        |         |        |       | E         |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Cabin - Electronics - Programming                       |           |        |        |         |        |       | E         |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Main Body - Structure - Conception                      |           |        |        |         | E      |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Main Body - Structure - CAD                             |           |        |        |         |        | E     |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Main Body - Structure - FEM                             |           |        |        | E       |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Main Body - Kinematics - Dimensioning                   |           |        |        |         |        |       | E         |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Main Body - Kinematics - Calculation                    |           |        |        |         |        |       | E         |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Main Body - Kinematics - CAD                            |           |        |        |         |        |       |           | E       |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Main Body - Kinematics - Kinematics analysis            |           |        |        |         |        |       |           | E       |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Body - Integration                                      |           | E      |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Development Drivetrain                                  |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Derivation of Requirements                 |           |        |        |         |        |       |           | E       |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Structure - Conception                     |           |        |        |         |        |       |           |         | E      |       |        | E     |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Structure - CAD                            |           |        |        |         |        |       |           |         |        | E     | E      |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Structure - FEM                            |           |        |        |         |        |       |           |         |        | E     | E      |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Kinematics - Dimensioning                  |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      | E        |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Kinematics - Calculation                   |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      | E        |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Kinematics - CAD                           |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          | E      | E      |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Kinematics - Kinematics analysis           |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          | E      |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Electronics - Layouting                    |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       | E    |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Electronics - Software architecture        |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       | E    |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Electronics - Select electrical components |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       | E    |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Electronics - Programming                  |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       | E    |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Drivetrain - Integration                                |           |        |        |         |        |       |           | E       |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Development Arm   |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Arm - Derivation of Requirements                        |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        | E     |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Arm Bottom Structure - Structure - Conception           |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       | E        |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Arm Bottom Structure - Structure - CAD                  |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       | E        |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Arm Bottom Structure - Structure - FEM                  |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       | E        |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Arm Central Structure - Structure - Conception          |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          | E     |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Arm Central Structure - Structure - CAD                 |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          | E     |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Arm Central Structure - Structure - FEM                 |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          | E     |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Arm Top structure - Structure - Conception              |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          | E     |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Arm Top structure - Structure - CAD                     |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          | E     |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Arm Top structure - Structure - FEM                     |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          | E     |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Arm - Kinematics - Dimensioning                         |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        | E    |        |       |          |      |        |  |
| Arm - Kinematics - Calculation                          |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        | E    |        |       |          |      |        |  |
| Arm - Kinematics - CAD                                  |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        | E    |        |       |          |      |        |  |
| Arm - Kinematics - Kinematics analysis                  |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        | E    |        |       |          |      |        |  |
| Arm - Hydraulics - Calculation                          |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      | E      |       |          |      |        |  |
| Arm - Hydraulics - CAD                                  |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      | E      |       |          |      |        |  |
| Arm - Hydraulics - CFD simulation                       |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      | E      |       |          |      |        |  |
| Arm - Electronics - Layouting                           |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        | E    |        |       |          |      |        |  |
| Arm - Electronics - Software architecture               |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        | E    |        |       |          |      |        |  |
| Arm - Electronics - Select electrical components        |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        | E    |        |       |          |      |        |  |
| Arm - Electronics - Programming                         |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        | E    |        |       |          |      |        |  |
| Arm - Integration                                       |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       | E        |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Development Gripper                                     |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      |        |  |
| Gripper - Derivation of Requirements                    |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       | E        |       |        |      |        |       | E        |      |        |  |
| Gripper - External - Development Gearing                |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       | E        |      |        |  |
| Gripper - External - Development Structure              |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          | E    |        |  |
| Gripper - External - Development Hydraulics             |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       |          |       |        |      |        |       |          |      | E      |  |
| Gripper - Integration                                   |           |        |        |         |        |       |           |         |        |       |        |       |      |          |        |        |       | E        |       |        |      |        | E     |          |      |        |  |

Abbildung 9-5 Responsibility Assignment Matrix (RAM) im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.  
 Abkürzungen: A - Accountable, E - Executing.

| Komponenten Funktionen                                  | Entwicklungsprozessschritte      |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
|---|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|   | LegoFunction #12 - Close Gripper | LegoFunction #2 - Connect to Object | LegoFunction #8 - Convert Energy | LegoFunction #7 - Convert Signal | LegoFunction #1 - Excavate | LegoFunction #3 - Lift Object | LegoFunction #5 - Lower Object | LegoFunction #14 - Move Arm | LegoFunction #18 - Move Body | LegoFunction #11 - Move Excavator | LegoFunction #19 - Move Left Tracks | LegoFunction #4 - Move Object | LegoFunction #16 - Move Part of Arm | LegoFunction #20 - Move Right Tracks | LegoFunction #15 - Move Whole Arm | LegoFunction #13 - Open Gripper | LegoFunction #10 - Protect Operator | LegoFunction #6 - Release Object | LegoFunction #17 - Rotate Body | LegoFunction #9 - Store Energy | LegoFunction #21 - Structural |
| Master PEP  |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Definition System Requirements                          |                                  |                                     |                                  |                                  | x                          |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Definition System Concept                               |                                  |                                     |                                  | x                                |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Development Subsystems                                  |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Integration of Subsystems and Testing                   |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Development Body  |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Body - Derivation of Requirements                       |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Cabin - Structure - Conception                          |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 | x                                   |                                  |                                |                                | x                             |
| Cabin - Structure - CAD                                 |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Cabin - Structure - FEM                                 |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Cabin - Electronics - Layouting                         |                                  |                                     |                                  |                                  | x                          |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Cabin - Electronics - Software architecture             |                                  |                                     |                                  |                                  | x                          |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Cabin - Electronics - Select electrical components      |                                  |                                     |                                  |                                  | x                          |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Cabin - Electronics - Programming                       |                                  |                                     |                                  |                                  | x                          |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Main Body - Structure - Conception                      |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                | x                             |
| Main Body - Structure - CAD                             |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Main Body - Structure - FEM                             |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Main Body - Kinematics - Dimensioning                   | x                                | x                                   |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               | x                                   |                                      | x                                 | x                               |                                     |                                  |                                | x                              |                               |
| Main Body - Kinematics - Calculation                    | x                                | x                                   |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               | x                                   |                                      | x                                 | x                               |                                     |                                  |                                | x                              |                               |
| Main Body - Kinematics - CAD                            |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Main Body - Kinematics - Kinematics analysis            |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Body - Integration                                      |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Development Drivetrain                                  |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Derivation of Requirements                 |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Structure - Conception                     |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                | x                             |
| Drivetrain - Structure - CAD                            |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Structure - FEM                            |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Kinematics - Dimensioning                  |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   | x                                   |                               |                                     | x                                    |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Kinematics - Calculation                   |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   | x                                   |                               |                                     | x                                    |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Kinematics - CAD                           |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Kinematics - Kinematics analysis           |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Electronics - Layouting                    |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Electronics - Software architecture        |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Electronics - Select electrical components |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Electronics - Programming                  |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Drivetrain - Integration                                |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Development Arm   |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Derivation of Requirements                        |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm Bottom Structure - Structure - Conception           |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                | x                             |
| Arm Bottom Structure - Structure - CAD                  |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm Bottom Structure - Structure - FEM                  |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm Central Structure - Structure - Conception          |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                | x                             |
| Arm Central Structure - Structure - CAD                 |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm Central Structure - Structure - FEM                 |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm Top structure - Structure - Conception              |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                | x                             |
| Arm Top structure - Structure - CAD                     |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm Top structure - Structure - FEM                     |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Kinematics - Dimensioning                         |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Kinematics - Calculation                          |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Kinematics - CAD                                  |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Kinematics - Kinematics analysis                  |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Hydraulics - Calculation                          |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                | x                             |
| Arm - Hydraulics - CAD                                  |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Hydraulics - CFD simulation                       |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Electronics - Layouting                           |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Electronics - Software architecture               |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Electronics - Select electrical components        |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Electronics - Programming                         |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Arm - Integration                                       |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Development Gripper                                     |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Gripper - Derivation of Requirements                    | x                                | x                                   |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 | x                                   |                                  |                                | x                              |                               |
| Gripper - External - Development Gearing                |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Gripper - External - Development Structure              |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Gripper - External - Development Hydraulics             |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |
| Gripper - Integration                                   |                                  |                                     |                                  |                                  |                            |                               |                                |                             |                              |                                   |                                     |                               |                                     |                                      |                                   |                                 |                                     |                                  |                                |                                |                               |

Abbildung 9-6 Zuordnung der Funktionen auf Entwicklungsaktivitäten im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

| Komponenten Funktionen                                  | Entwicklungsprozessschritte |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
|---|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--|--|---------------------------------------|--|--------------------------------|---------------------------------|---|--|--|--|---|--|----------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|---|--|
|   | LEGO Excavator              | LegoModule #1 - Arm 1: Gearing | LegoModule #10 - Arm 1: Top structure | LegoModule #11 - Arm 2: Structure | LegoModule #12 - Arm 2: Top structure | LegoModule #13 - Arm 3: Structure | LegoModule #14 - Gripper: Structure | LegoModule #15 - Body: Gearing | LegoModule #16 - Body: Cabin structure | LegoModule #17 - Body: Central structure | LegoModule #18 - Body: Left structure | LegoModule #19 - Body: Right structure | LegoModule #2 - Arm 2: Gearing | LegoModule #20 - Body: Rotation | LegoModule #21 - Drivetrain: Left chain | LegoModule #22 - Drivetrain: Right chain | LegoModule #23 - Drivetrain: Chain tread | LegoModule #24 - Drivetrain: Central structure | LegoModule #25 - Drivetrain: Left structure | LegoModule #26 - Drivetrain: Right structure | LegoModule #27 - Arm | LegoModule #28 - Body | LegoModule #29 - Drivetrain | LegoModule #3 - Arm 3: Gearing | LegoModule #4 - Gripper: Gearing | LegoModule #5 - Arm 1: Hydraulics | LegoModule #6 - Arm 2: Hydraulics | LegoModule #7 - Gripper: Hydraulics | LegoModule #8 - Arm 1: Structure | LegoModule #9 - Arm 1: Bottom structure |   |  |
| Master PEP  |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Definition System Requirements                          |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Definition System Concept                               |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Development Subsystems                                  | x                           |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Integration of Subsystems and Testing                   | x                           |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Development Body  |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Body - Derivation of Requirements                       |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       | x                           |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Cabin - Structure - Conception                          |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Cabin - Structure - CAD                                 |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                | x                                      |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Cabin - Structure - FEM                                 |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     | x                              |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Cabin - Electronics - Layouting                         |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Cabin - Electronics - Software architecture             |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Cabin - Electronics - Select electrical components      |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Cabin - Electronics - Programming                       |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Main Body - Structure - Conception                      |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  | x  | x                                     | x                                      |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Main Body - Structure - CAD                             |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  | x  | x                                     | x                                      |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Main Body - Structure - FEM                             |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  | x  | x                                     | x                                      |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Main Body - Kinematics - Dimensioning                   |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Main Body - Kinematics - Calculation                    |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Main Body - Kinematics - CAD                            |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                | x                                      |  |                                       |  |                                | x                               |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Main Body - Kinematics - Kinematics analysis            |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     | x                              |  |  |                                       |  |                                | x                               |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Body - Integration                                      |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       | x                           |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Development Drivetrain                                  |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Derivation of Requirements                 |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             | x                              |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Structure - Conception                     |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Structure - CAD                            |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  | x  | x  | x   | x  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Structure - FEM                            |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  | x  | x  | x   | x  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Kinematics - Dimensioning                  |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Kinematics - Calculation                   |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Kinematics - CAD                           |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   | x  | x  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Kinematics - Kinematics analysis           |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   | x  | x  | x  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Electronics - Layouting                    |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Electronics - Software architecture        |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Electronics - Select electrical components |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Electronics - Programming                  |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Drivetrain - Integration                                |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Development Arm   |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Derivation of Requirements                        |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             | x                              |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm Bottom Structure - Structure - Conception           |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm Bottom Structure - Structure - CAD                  |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   | x |  |
| Arm Bottom Structure - Structure - FEM                  |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   | x |  |
| Arm Central Structure - Structure - Conception          |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm Central Structure - Structure - CAD                 |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   | x |  |
| Arm Central Structure - Structure - FEM                 |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   | x |  |
| Arm Top structure - Structure - Conception              |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm Top structure - Structure - CAD                     |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm Top structure - Structure - FEM                     |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Kinematics - Dimensioning                         |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Kinematics - Calculation                          |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Kinematics - CAD                                  |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Kinematics - Kinematics analysis                  |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Hydraulics - Calculation                          |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Hydraulics - CAD                                  |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Hydraulics - CFD simulation                       |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Electronics - Layouting                           |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Electronics - Software architecture               |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Electronics - Select electrical components        |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Electronics - Programming                         |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Arm - Integration                                       |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Development Gripper                                     |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Gripper - Derivation of Requirements                    |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Gripper - External - Development Gearing                |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Gripper - External - Development Structure              |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Gripper - External - Development Hydraulics             |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |
| Gripper - Integration                                   |                             |                                |                                       |                                   |                                       |                                   |                                     |                                |  |  |                                       |  |                                |                                 |   |  |  |  |   |  |                      |                       |                             |                                |                                  |                                   |                                   |                                     |                                  |   |   |  |

Abbildung 9-7 Zuordnung der Komponenten auf Entwicklungsaktivitäten im illustrativen Beispiel LEGO Bagger.

## 9.4 Ergänzende Informationen zur Fallstudie TUfast

Tabelle 9-6 Teilergebnisse der Fragebogenstudie eines Studienarbeitsprojekts (PE-Spath 2016).

| Wo sehen Sie Vorteile an der Teamstruktur und Baugruppengliederung?   | Wo sehen Sie die Nachteile an der Teamstruktur und Baugruppengliederung?   |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• „Enges Zusammenarbeiten; gute Kommunikation in der Baugruppe; besseres Zusammenarbeiten innerhalb der Baugruppe; strukturiert“</li> <li>• „Man hat mit Leuten mit denen man engeren Kontakt hat persönliche Kommunikation. ,man traut sich eher jemanden zu schreiben““</li> <li>• „Die klare Struktur“</li> <li>• „Klare Zuteilung“</li> <li>• „Bessere Kommunikation; direkter Ansprechpartner“</li> <li>• „Verteilt auf mehrerer Köpfe -&gt; Fokus auf ein Gebiet“</li> <li>• „Klare Ansprechpartner -&gt; unabhängigere Konstruktion und Fertigung nach Festlegung der Überschneidungen“</li> <li>• „Klare Struktur; man weiß wer für was zuständig ist“</li> <li>• „Zusammenfassung gleicher aufgaben“</li> <li>• „Kleine Teams, die schneller besser arbeiten können, da sonst Meinungsvielfalt und Kommunikation zu aufwendig“</li> <li>• „Kleiner Teams -&gt; man kann besser kommunizieren“</li> <li>• „Fachspezifisches Einarbeiten; Entstehen eines ‚harten‘ Kerns in jeder Baugruppe; [...]“</li> <li>• „Es braucht immer einen Hauptverantwortlichen, der sein Team antreibt“</li> <li>• „Man hat immer einen Ansprechpartner; Es gibt jemanden, der sich um die Bürokratie kümmert; letzte Instanz bei Entscheidungen“</li> <li>• „Klare Verantwortlichkeiten; keine zu großen Gruppen zu koordinieren“</li> <li>• „Strukturiert“</li> <li>• „Arbeitsteilung“</li> <li>• „Schwerpunkte Alu &lt;-&gt; Carbon &lt;-&gt; Elektronik; klare Zuständigkeit bisher?“</li> <li>• „Organisatorisch“</li> <li>• „Die einzelnen Baugruppen werden von Mitgliedern geführt, die viel Expertise in ihrem jeweiligen Bereich aufweisen“</li> <li>• „Kleine Gruppe -&gt; Konkrete Ansprechperson, klare Aufgabenteilung“</li> <li>• „BGL hält lästiges Beiwerk (Budget) Weitgehendste fern“</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• „Wenig wissen anderer Baugruppen, Info im Meeting anderer Baugruppen kommt meistens zu kurz“</li> <li>• „Man hat Hemmungen mit Personen aus anderen Baugruppen zu Reden (obwohl es notwendig ist, weil die Bauteile benachbart sind)“</li> <li>• „Die Kommunikation; jeder braut sein eigenes Süppchen“</li> <li>• „Teilweise sehr viele Aufgaben auf einmal für eine Baugruppe“</li> <li>• „Bei fehlender Beteiligung können Informationen verloren gehen“</li> <li>• „Zuviel Zeitaufwand trotz der Struktur“</li> <li>• „Schnittstellen; Kommunikation über 2-3 Personen“</li> <li>• „Kommunikation“</li> <li>• „Schwierige Kommunikation zwischen den Baugruppen“</li> <li>• „Man fühlt sich die die anderen BG nicht verantwortlich“</li> <li>• „Evtl. gehen bei Lösungsfindungsprozess Lösungen verloren, weil ein Chassist z.B. eine gute Fahrwerkslösung hätte: Baugruppengrößen &gt; 10 → viel zu viel Orgakram“</li> <li>• „Baugruppengröße kann zu groß werden → Lieber kleine Baugruppen und dafür die Leute mehr einspannen“</li> <li>• „Kommunikation zwischen Baugruppen schwieriger“</li> <li>• „Schwer alleine koordinierbar ab Größen über 12 Leuten pro BG“</li> <li>• „Kommunikationsprobleme; keiner fühlt sich zuständig; eindeutige Abgrenzung schwierig“</li> <li>• „normale‘ Teammitglieder fühlen häufig nicht gleiche Verantwortung gegenüber dem Projekt wie Teamleiter → weniger Zeitaufwand, Zuverlässigkeit, Enthusiasmus“</li> <li>• „Überschneidungen → Kommunikation? Nicht was von allen eingebunden“</li> <li>• „Zu grob; Baugruppen sollten nochmal in sich besser unterteilt werden“</li> <li>• „Ohne ausreichende Kommunikation der Teamleitung ist das Projekt stark gefährdet“</li> <li>• „Eventuell kaum Kommunikation außerhalb der eigenen Baugruppe“</li> <li>• „Mangelnde Kommunikation bei Schnittstellen zwischen den Baugruppen“</li> <li>• „Mangelnde Kenntnis, Erfahrung, Verständnis für Schwierigkeiten v. a. eli16“</li> </ul> |



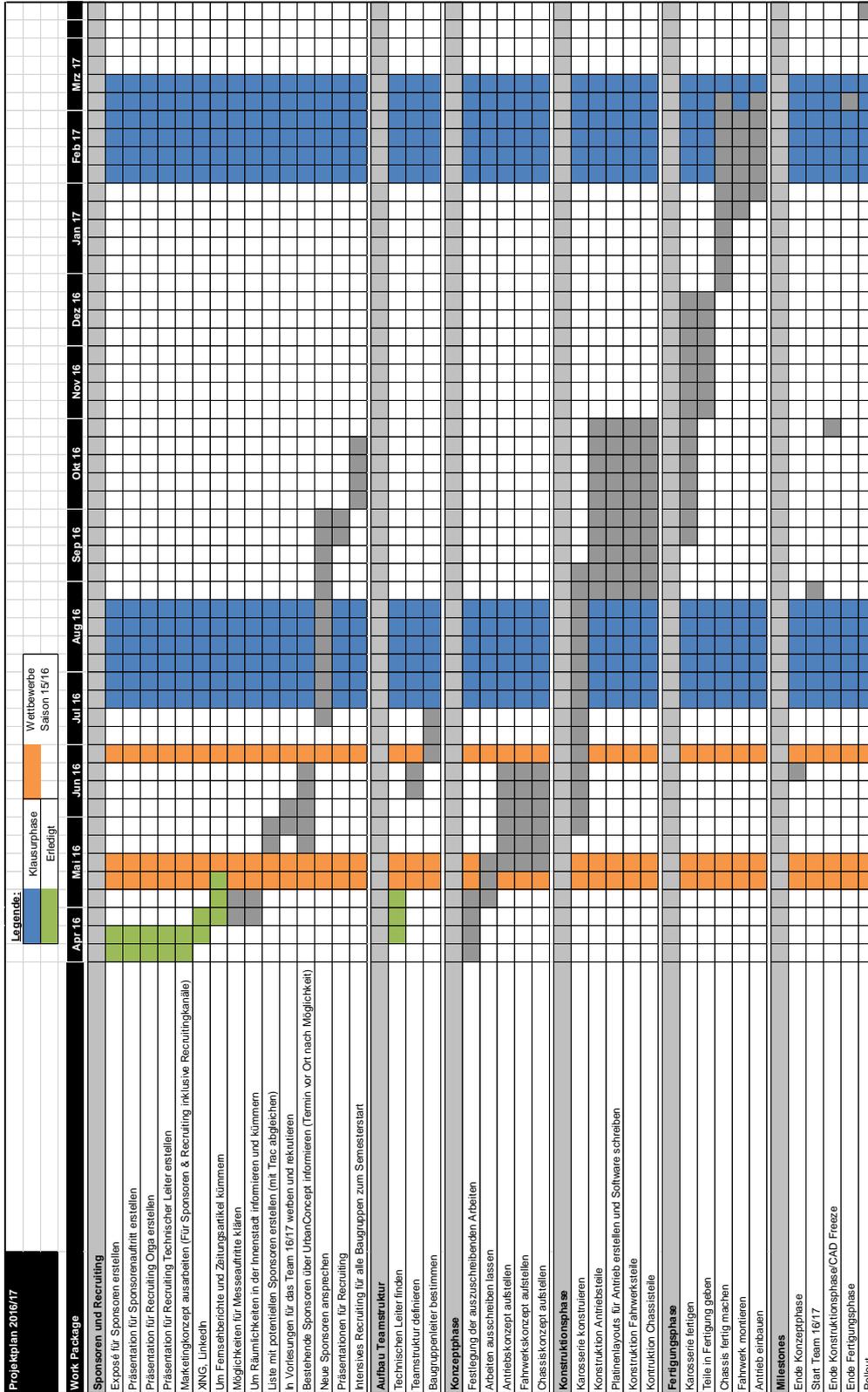


Abbildung 9-9 Projektplan im Urban Concept Entwicklungsprojekt (Stand: 26.05.2016).

## 9.5 Ergänzende Informationen zur Fragebogenstudie

Hinweis: Im Fragebogen wird noch nicht zwischen Abstimmungsbedarf und Koordinationsbedarf differenziert. Stattdessen wird nur von Koordinationsbedarf gesprochen.

Lehrstuhl für Produktentwicklung  
Fakultät für Maschinenwesen  
Technische Universität München



# Strukturbasierte Koordinationsplanung in komplexen Entwicklungsprojekten

## Fragebogen

### Zielsetzung

- Bewertung des Nutzens des Ansatzes zur strukturbasierten Koordinationsplanung.
- Einschätzung wie die Faktoren *Kritikalität*, *Distanz* und *Nähe* mit der Relevanz eines Koordinationsbedarfs korrelieren.
- Feedback.

### Vertraulichkeit

Ihre Antworten werden selbstverständlich vertraulich behandelt und ausgewertet.

Name: \_\_\_\_\_

Position/Rolle im Projekt: \_\_\_\_\_

Entwicklungserfahrung: \_\_\_\_\_ Jahre

**Vielen Dank für Ihre Teilnahme!**



# Fragebogen

F1. Wie wichtig ist das Thema Koordination für Sie?

|   | Nie    |        |        |        |        | Sehr häufig | Keine Antwort |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|---------------|
| F1.1 Wie häufig kommt es Ihrer Erfahrung nach vor, dass in einem Projekt Fehler oder Nacharbeit aufgrund unzureichender Koordination auftreten? | 1<br>0 | 2<br>0 | 3<br>0 | 4<br>0 | 5<br>0 |             | 0             |

|   | Sehr niedrig |        |        |        | Sehr hoch | Keine Antwort |
|---|--------------|--------|--------|--------|-----------|---------------|
| F1.2 Wie hoch schätzen Sie derzeit das Risiko ein, dass es im anstehenden Entwicklungsprojekt Fehler oder Nacharbeit aufgrund unzureichender Koordination geben wird? | 1<br>0       | 2<br>0 | 3<br>0 | 4<br>0 | 5<br>0    | 0             |

F2. Welche Indikatoren eignen sich zur Einschätzung der Relevanz eines Koordinationsbedarfs?

|  | Stimme nicht zu |        |        |        |        | Stimme voll zu | Keine Antwort |
|--|-----------------|--------|--------|--------|--------|----------------|---------------|
| F2.1 Die <b>Kritikalität</b> (Kennzahl aus der Produktstruktur) zweier Produktelemente mit einer technischen Abhängigkeit ist ein guter Indikator für die Wichtigkeit des damit einhergehenden Koordinationsbedarfs. | 1<br>0          | 2<br>0 | 3<br>0 | 4<br>0 | 5<br>0 |                | 0             |
| F2.2 Die <b>Distanz</b> (Kennzahl aus der Organisationsstruktur) zwischen zwei Organisationseinheiten ist ein guter Indikator für den Widerstand gegen eine erfolgreiche Abstimmung.                                 | 1<br>0          | 2<br>0 | 3<br>0 | 4<br>0 | 5<br>0 |                | 0             |
| F2.3 Die <b>Nähe</b> (Kennzahl aus der Organisations- und Prozessstruktur) zwischen zwei Organisationseinheiten ist ein guter Indikator für die Wahrscheinlichkeit einer Abstimmung auch ohne bewusste Koordination. | 1<br>0          | 2<br>0 | 3<br>0 | 4<br>0 | 5<br>0 |                | 0             |

|  |  |
|--|--|
| F2.4 Fallen Ihnen weitere Indikatoren ein? |  |
|--|--|



F3. Wie bewerten Sie insgesamt den Mehrwert des Ansatzes zur strukturbasierten Koordinationsplanung?

|  | Stimme<br>nicht zu |        | Stimme<br>voll zu |        |        | Keine<br>Antwort |
|--|--------------------|--------|-------------------|--------|--------|------------------|
| F3.1 Ich halte den Ansatz zur strukturbasierten Koordinationsplanung prinzipiell für hilfreich.  | 1<br>0             | 2<br>0 | 3<br>0            | 4<br>0 | 5<br>0 | o                |
| F3.2 Der Ansatz hat bisher unbekannte Koordinationsbedarfe innerhalb der Entwicklung (aufgrund technischer Abhängigkeiten auf Produktebene) identifiziert. | 1<br>0             | 2<br>0 | 3<br>0            | 4<br>0 | 5<br>0 | o                |
| F3.3 Die Analyseergebnisse sind plausibel.   | 1<br>0             | 2<br>0 | 3<br>0            | 4<br>0 | 5<br>0 | o                |
| F3.4 Basierend auf den Analyseergebnissen lassen sich gezielt Koordinationsmaßnahmen planen und somit das Koordinationsrisiko reduzieren.                  | 1<br>0             | 2<br>0 | 3<br>0            | 4<br>0 | 5<br>0 | O                |

F4. Wie bewerten Sie die Aussagekraft und den Nutzen der einzelnen Analyseergebnisse?

|   | Stimme<br>nicht zu |        | Stimme<br>voll zu |        |        | Keine<br>Antwort |
|---|--------------------|--------|-------------------|--------|--------|------------------|
| F4.1 Die <b>Auflistung der Koordinationsbedarfe</b> gibt relevante und hilfreiche Hinweise auf Handlungsbedarfe zur Reduktion des Koordinationsrisikos.   | 1<br>0             | 2<br>0 | 3<br>0            | 4<br>0 | 5<br>0 | o                |
| F4.2 Die <b>Alignment-Matrix</b> gibt relevante und hilfreiche Hinweise auf Handlungsbedarfe zur Reduktion des Koordinationsrisikos.  | 1<br>0             | 2<br>0 | 3<br>0            | 4<br>0 | 5<br>0 | o                |
| F4.3 Das <b>personenzentrierte Koordinationsnetz</b> der abgeleiteten Koordinationsbedarfe zwischen Organisationseinheiten gibt hilfreiche Hinweise, zwischen welchen Organisationseinheiten ein Risiko zu geringer Koordination besteht. | 1<br>0             | 2<br>0 | 3<br>0            | 4<br>0 | 5<br>0 | o                |

F5. Haben Sie ergänzende Kommentare oder Anregungen?

|                       | Position                             | Erfahrung | F1.1 | F1.2 | F2.1 | F2.2 | F2.3 | F2.4  |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------|------|------|------|------|------|---|
| Fallstudie Anlagenbau | 1 Gruppen u. Projektleiter           | 20        | 5    | 3    | 5    | 5    | 5    | * Gleiche oder unterschiedliche Disziplinen<br>* "Chemie" zwischen den Parteien<br>* Charaktereigenschaften (Kommunikator, Einzelgänger)<br>* Sprachliche Unterschiede (Deutsch - Japanisch - Englisch...)<br>* Persönlichkeiten<br>* Organisationsgrößen |
|                       | 2 Projektleiter                      | 12        | 5    | 3    | 4    | 5    | 4    | * Persönlicher Kontakt (Sympathie)<br>* Dringlichkeit (zeitkritisch)<br>* kulturelle Aspekte: unterschiedliche Arbeitsweisen erfordern evtl. bessere Abstimmung<br>* Sprache bzw. Sprachkenntnisse<br>* Teammitglieder: Teamfähigkeit (wer kennt wen?)    |
|                       | 3 Mechanische Konstruktion           | 14        | 3    | 2    | 4    | 4    | 4    |   |
|                       | 4 Mech. Entwicklung                  | 2         | 4    | 5    | 5    | 3    | 3    |   |
|                       | 5 Elektrotechnik                     | 7,5       | 3    | 2    | 3    | 4    | 5    |   |
|                       | <b>Durchschnittswerte</b>            | 11,10     | 4    | 3    | 4,2  | 4,2  | 4,2  |   |
| Fallstudie Tufast     | 1 Baugruppenleiter Fahrwerk          | 0,5       | 5    | 5    | 3    | 4    | 4    | * Örtliche Indikatoren (Standort, Abteilung)<br>* Im Fall Tufast: Auslandsaufenthalte   |
|                       | 2 Teamleiter                         | 1         | 5    | 5    | 4    | 4    | 5    | Wie mündlich besprochen: Zeit(plan), Gewichtung der Schnittstellen (geometrisch > Informationsfluss)  |
|                       | 3 Baugruppenleiter Chassis Fertigung | 1         | 4    | 4    | 3    | 4    | -    |   |
|                       | 4 Technischer Leiter                 | 2         | 5    | 5    | 5    | 4    | 5    | * Koordinationsfähigkeit eines Individuums als Ergänzung zur Nähe<br>* Komplexität des Bauteils/Änderungsaufwand  |
|                       | 5 Baugruppenleiter Fahrwerk          | 0,5       | 4    | 5    | 5    | 5    | 3    | Bei uns leider die Erreichbarkeit, da viele Mitglieder zu selten persönlich vor Ort sind --> behindert die Kommunikation enorm  |
|                       | 6 Teamleitung Antrieb                | 1,5       | 2    | 3    | 4    | 3    | -    |   |
|                       | <b>Durchschnittswerte</b>            | 1,08      | 4,17 | 4,5  | 4    | 4    | 4,25 |   |
|                       | <b>Gesamt Durchschnittswerte</b>     | 6,09      | 4,08 | 3,75 | 4,1  | 4,1  | 4,22 |   |

Abbildung 9-10 Einzelne Aufschlüsselung der Antworten in der Fragebogenstudie (Teil 1).

|                                      |             | Fallstudie Anlagenbau |             |            |             |            | Fallstudie Tufast |             |            |             |            | F5          |            |             |  |
|--------------------------------------|-------------|-----------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|--|
| Position                             | F3.1        | F3.2                  | F3.3        | F3.4       | F4.1        | F4.2       | F4.3              | F3.1        | F3.2       | F3.3        | F3.4       | F4.1        | F4.2       | F4.3        | F5   |
| 1 Gruppen u. Projektleiter           | 3           | 2                     | 3           | 2          | 4           | 3          | 3                 | 3           | 2          | 3           | 2          | 4           | 3          | 3           | Sehr abhängig von den zugrunde liegenden Daten und deren Interpretation.   |
| 2 Projektleiter                      | 4           | 4                     | 3           | 3          | 4           | 4          | 4                 | 4           | 4          | 3           | 3          | 4           | 4          | 4           | Grundlage ist eine verlässliche Datenbasis, die zum jetzigen Zeitpunkt (noch) nicht gegeben ist.   |
| 3 Mechanische Konstruktion           | 4           | 3                     | 2           | 3          | 2           | 3          | 3                 | 3           | 2          | 3           | 3          | 2           | 3          | 3           | -  |
| 4 Mech. Entwicklung                  | 4           | 3                     | 2           | 3          | 4           | 2          | 2                 | 4           | 3          | 3           | 3          | 4           | 2          | 2           | -  |
| 5 Elektrotechnik                     | 3           | 3                     | 4           | 3          | 2           | 2          | 2                 | 3           | 4          | 3           | 2          | 2           | 2          | 2           | -  |
| <b>Durchschnittswerte</b>            | <b>3,6</b>  | <b>3</b>              | <b>2,8</b>  | <b>2,8</b> | <b>3,2</b>  | <b>2,8</b> | <b>2,8</b>        | <b>3,6</b>  | <b>3</b>   | <b>2,8</b>  | <b>2,8</b> | <b>3,2</b>  | <b>2,8</b> | <b>2,8</b>  |  |
| 1 Baugruppenleiter Fahrwerk          | 5           | 2                     | 3           | 4          | 4           | 5          | 4                 | 5           | 2          | 3           | 4          | 4           | 5          | 4           | * Art der Schnittstelle unbedingt berücksichtigen<br>* Evtl. Relevanz eines Bauteils für das Gesamtziel berücksichtigen  |
| 2 Teamleiter                         | 4           | 3                     | 4           | 4          | 4           | 4          | 4                 | 4           | 4          | 4           | 4          | 4           | 4          | 3           | -  |
| 3 Baugruppenleiter Chassis Fertigung | 4           | 2                     | 3           | 4          | 3           | 3          | 4                 | 3           | 2          | 3           | 4          | 3           | 3          | 3           | -  |
| 4 Technischer Leiter                 | 5           | -                     | 5           | 5          | 5           | 4          | 5                 | 5           | 5          | 5           | 5          | 5           | 4          | 5           | Indirekte Schnittstellen gelegentlich sehr irreführend   |
| 5 Baugruppenleiter Fahrwerk          | 5           | 2                     | 4           | 4          | 5           | 4          | 4                 | 5           | 4          | 4           | 4          | 5           | 4          | 5           | * Schnittstellenunterscheidung: Informationsfluss <--><br>Geometrische Schnittstellen<br>* Bin erstaunt, wie gut die Analyse teilweise kritische Stellen aufzeigt. |
| 6 Teamleitung Antrieb                | 5           | 4                     | 4           | 3          | 5           | 4          | 3                 | 5           | 4          | 4           | 3          | 5           | 4          | 5           | Gewichtung der Art der Schnittstellen erscheint sinnvoll.  |
| <b>Durchschnittswerte</b>            | <b>4,67</b> | <b>2,6</b>            | <b>3,83</b> | <b>4</b>   | <b>4,33</b> | <b>4</b>   | <b>4</b>          | <b>4,33</b> | <b>4</b>   | <b>3,83</b> | <b>3,4</b> | <b>4,33</b> | <b>4</b>   | <b>4,17</b> |  |
| <b>Gesamt Durchschnittswerte</b>     | <b>4,13</b> | <b>2,82</b>           | <b>3,32</b> | <b>3,4</b> | <b>3,77</b> | <b>3,4</b> | <b>3,4</b>        | <b>3,77</b> | <b>3,4</b> | <b>3,32</b> | <b>3,4</b> | <b>3,77</b> | <b>3,4</b> | <b>3,48</b> |  |

Abbildung 9-11 Einzelne Aufschlüsselung der Antworten in der Fragebogenstudie (Teil 2).

# 10. Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung

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 Stirnzahnradern. 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 SAUERMANN, 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 KITTSCHNEIDER, 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 Teilverwaltung 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 Automobilindustrie.  
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 Kraftereinleitungsstellenkonstruktion 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 Hilfsmittelführung 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 HEPPELE, 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  
München: TU, Diss. 2017.
- 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  
München: TU, Diss. 2017.
- D147 HASHEMI FARZANEH, H.:  
Bio-inspired design: Ideation in collaboration between mechanical engineers and biologists  
München: TU, Diss. 2017.
- 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  
München: TU, Diss. 2017.
- D152 MICHAILIDOU, I.:  
Design the experience first: A scenario-based methodology for the design of complex, tangible consumer  
products  
München: TU, Diss. 2017.
- D153 SCHMIDT, D.M.:  
Increasing Customer Acceptance in Planning Product-Service Systems  
München: Dr. Hut 2017 (Reihe Produktentwicklung). Zugl. München: TU, Diss. 2017.
- D154 ROTH, M.:  
Efficient Safety Method Kit for User-driven Customization  
München: Dr. Hut 2017 (Reihe Produktentwicklung).
- D155 PLÖTNER, M.:  
Integriertes Vorgehen zur selbstindividualisierungsgerechten Produktstrukturplanung  
TU München: 2017. (als Dissertation eingereicht)
- D156 HERBST, L.-M.:  
Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung raumfunktionaler Kundenanforderungen in der Automobil-  
entwicklung  
München: Dr. Hut 2017 (Reihe Produktentwicklung).
- D157 KAMMERL, D. M. A.:  
Modellbasierte Planung von Produkt-Service-Systemen  
TU München: 2017. (als Dissertation eingereicht)
- D158 MÜNZBERG, C. H. W.:  
Krisen in der Produktentwicklung und ihre operative Bewältigung  
TU München: 2017. (als Dissertation eingereicht)
- D159 HEIMBERGER, N.:  
Strukturbasierte Koordinationsplanung in komplexen Entwicklungsprojekten  
München: TU, Diss. 2018.

D160 LANG, A.:

Im Spannungsfeld zwischen Risiken und Chancen – Eine Methode zur Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Öffnung der Produktentwicklung

TU München: 2017. (als Dissertation eingereicht)

D161 ALLAVERDI, D.:

Systematic identification of Flexible Design Opportunities in offshore drilling systems

TU München: 2017. (als Dissertation eingereicht)