

**Jens Resch**

**Kontextorientierte Entwicklung und Absicherung  
von festen Verbindungen im  
Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie**

Berichte aus dem  
INSTITUT FÜR MASCHINEN- UND  
GERÄTEKONSTRUKTION (IMGK)

Herausgegeben von  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin (Maschinenelemente),  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska (Feinwerktechnik) und  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber (Konstruktionstechnik)  
aus dem Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK) an  
der TU Ilmenau.

Band 27

Diese Reihe setzt die „Berichte aus dem Institut für  
Maschinenelemente und Konstruktion“ fort.

# **Kontextorientierte Entwicklung und Absicherung von festen Verbindungen im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie**

Jens Resch



Universitätsverlag Ilmenau  
2016

# Impressum

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 17. März 2014

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber  
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann  
(Technische Universität Ilmenau)

3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber  
(Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität des Saarlandes)

Tag der Verteidigung: 04. Mai 2016

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

### **Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

### **Herstellung und Auslieferung**

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

[www.mv-verlag.de](http://www.mv-verlag.de)

**ISSN** 2191-8082 (Druckausgabe)

**ISBN** 978-3-86360-143-0 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016000373

## Geleitwort der Herausgeber

Die Konstruktion von Maschinen und Geräten sowie die zugehörigen Methoden und Werkzeuge sind seit den frühen 1950er Jahren ein profilbildender Schwerpunkt an der Technischen Universität Ilmenau und ihren Vorgängerinstitutionen. Es war daher ein nahe liegender Schritt, dass die drei konstruktiv orientierten Fachgebiete der Fakultät für Maschinenbau – Maschinenelemente, Feinwerktechnik/Precision Engineering, Konstruktionstechnik – im Mai 2008 das Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK) neu gegründet haben. Das IMGK steht in der Tradition einer Kette ähnlicher Vorgängerinstitute, deren wechselnde Zusammensetzung hauptsächlich durch sich über der Zeit ändernde Universitätsstrukturen bedingt war.

Zweck des Institutes ist es, die Kompetenzen und Ressourcen der beteiligten Fachgebiete zu bündeln, um Forschung und Lehre zu verbessern und erzielte wissenschaftliche Ergebnisse gemeinsam in die Fachöffentlichkeit zu tragen. Ein wesentliches Instrument hierzu ist die Schriftenreihe des Instituts für Maschinen- und Gerätekonstruktion. Sie führt eine erfolgreiche Schriftenreihe des im Jahr 1991 gegründeten unmittelbaren Vorgängerinstitutes IMK (Institut für Maschinenelemente und Konstruktion) fort.

---

In der Schriftenreihe erscheinen in erster Linie die am Institut entstandenen Dissertationen, daneben werden aber auch andere Forschungsberichte, die in den thematischen Rahmen passen und von allgemeinem Interesse sind, in die Schriftenreihe aufgenommen.

Der vorliegende Band 27 ist als Dissertation am Fachgebiet für Maschinenelemente unter der wissenschaftlichen Betreuung von Univ. Prof. Dr. Ing. Christian Weber entstanden. Die Herausgeber wünschen sich reges Interesse an der Schriftenreihe und würden sich freuen, wenn sie zum fruchtbaren Dialog in Wissenschaft und Praxis beitragen würde.

Ilmenau, im Juli 2016

Univ. Prof. Dr. Ing. Ulf Kletzin (Maschinenelemente)

Univ. Prof. Dr. Ing. René Theska (Feinwerktechnik)

Univ. Prof. Dr. Ing. Christian Weber (Konstruktionstechnik)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Forschungszentrum der Daimler AG am Standort Ulm.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber, Fachgebiet Konstruktionstechnik der Technischen Universität Ilmenau für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Universität des Saarlandes, danke ich für die Übernahme des Koreferats. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann, Fachgebiet Fertigungstechnik der Technischen Universität Ilmenau danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Ebenso möchte ich mich bei den vielen Kollegen am Daimler Forschungszentrum in Ulm bedanken, die mir in vielen Gesprächen wertvolle Informationen und Anregungen gegeben haben. Allen voran danke ich Dr.-Ing. Thomas Bär und Dr.-Ing. Robert Meißner, die mit ihren kritischen Anmerkungen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Rahel und meiner Familie für ihre Geduld, Unterstützung und Motivation in all den Jahren.

Renningen, im Julie 2016

Jens Resch



## Zusammenfassung

Die Anforderungen an die Entwicklung und Absicherung von Produkten in der Automobilindustrie sind in den vergangenen Jahren erheblich gestiegen. Während einer Absicherung werden die Ist-Eigenschaften des Produktes analysiert und mit den geforderten Soll-Eigenschaften verglichen. Neben den bekannten Herausforderungen hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität steigt auch der Anspruch aufgrund der hohen Varianz der angebotenen Produkte. Treiber dieser Entwicklung sind vor allem neue Antriebstechnologien und eine Vielzahl von Assistenzsystemen welche einen immer größeren Einfluss auf die Gestaltung und Architektur neuer Produkte nehmen.

Produkte werden aufgrund funktionaler, herstellungs- oder wartungstechnischer Belange in eine Vielzahl von Einzelteilen und Baugruppen zerlegt. Gefügt werden diese Komponenten durch diverse Verbindungsarten, welche ein ungewolltes Lösen der Einzelteile verhindern. Prinzipiell lassen sich festen Verbindungen in lösbare Verbindungen (z.B. Schraub- oder Schnappverbindungen) und nicht-lösbare Verbindungen (z.B. Schweiß- oder Klebeverbindungen) unterteilen. Abhängig von der jeweiligen Verbindungsart wird eine Verbindung entweder mit oder ohne zusätzliche Verbindungshilfsmittel/-stoffe (z.B. Schrauben, Muttern, Kleber) gefügt.

---

In den frühen Phasen der Produktentwicklung werden die zukünftigen Eigenschaften des Produktes definiert und dessen Merkmale ausgearbeitet. Während der Produktentstehung müssen dann alle Eigenschaften aus nachfolgenden Lebensphasen hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit analysiert und bewertet werden. Dies geschieht beispielsweise durch Simulationen oder reale Prototypen. Mit Hilfe von digitalen Absicherungen lassen sich die Merkmale der beteiligten Systeme in den unterschiedlichen Lebensphasen mit den Merkmalen des Produktes in einem gemeinsamen Kontext analysieren.

Eine Analyse der Entwicklungsprozesse eines Automobilherstellers hat ergeben, dass innerhalb des Produktentstehungsprozesses unterschiedliche Methoden zur Dokumentation und Absicherung von festen lösbaren sowie festen nicht-lösbaren Verbindungen zum Einsatz kommen. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Konzept zur Dokumentation von Verbindungen entwickelt, welches auf alle festen Verbindungen anwendbar ist. Neben der Vereinheitlichung steht auch die Dokumentation von Kontextinformationen, d.h. Informationen die sich auf unterschiedlichen Lebensphasen des Produktes beziehen, im Vordergrund. Sowohl die allgemeinen, als auch die kontextabhängigen Informationen werden dabei in Verbindungsobjekten archiviert. Diese Informationen lassen sich anschließend in digitalen Absicherungsuntersuchungen nutzen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Hintergrund . . . . .	1
1.2. Problemstellung . . . . .	3
1.3. Zielsetzung . . . . .	5
1.4. Vorgehensweise . . . . .	6
1.4.1. Prozess . . . . .	6
1.4.2. Methode . . . . .	7
1.4.3. System . . . . .	8
1.4.4. Information . . . . .	9
1.4.5. Organisation . . . . .	10
1.4.6. Kontext . . . . .	11
1.5. Aufbau der Arbeit . . . . .	12
<b>2. Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>15</b>
2.1. Produktentstehungsprozess . . . . .	15
2.1.1. VDI 2221 . . . . .	19
2.1.2. Integrierte Produktentwicklung . . . . .	22
2.1.3. Property-Driven Development and Design . . . . .	23
2.1.4. Design of X vs. Design for X . . . . .	26
2.1.5. Absicherung im Produktentstehungsprozess . . . . .	30
2.2. Produktstrukturierungsmethoden . . . . .	32
2.2.1. Variantenmanagement . . . . .	33
2.2.2. Versionsmanagement . . . . .	34

2.2.3. Modularisierung . . . . .	35
2.2.4. Sichten . . . . .	36
2.3. Informationen im Produktentstehungsprozess . . . . .	37
2.3.1. Informationsarten . . . . .	38
2.3.2. Informationsflüsse . . . . .	38
2.4. Systeme im Produktentstehungsprozess . . . . .	40
2.4.1. Autorensysteme . . . . .	41
2.4.2. Verwaltungssysteme . . . . .	42
2.4.3. Zusammenspiel von Verwaltungs- und Autorensystemen . . . . .	44
2.5. Organisation . . . . .	45
2.5.1. Aufbauorganisation . . . . .	46
2.5.2. Ablauforganisation . . . . .	46
2.6. Kontext . . . . .	47
2.6.1. Kontextorientierte Absicherung . . . . .	47
2.7. Fazit . . . . .	50
<b>3. Grundlagen Verbindungen</b>	<b>53</b>
3.1. Verbindungen . . . . .	53
3.1.1. Lösbare Verbindungen . . . . .	57
3.1.2. Nicht-lösbare Verbindungen . . . . .	60
3.2. Dokumentation von Verbindungen . . . . .	61
3.2.1. Dokumentation auf Ebene des Zusammenbaus . . . . .	63
3.2.2. Dokumentation auf Ebene der Einzelteile . . . . .	67
3.3. Verbindungsinformationen . . . . .	71
3.3.1. Geometrische Informationen . . . . .	71
3.3.2. Referenzelemente . . . . .	72
3.3.3. Meta-Informationen . . . . .	73

3.4. Variantenmanagement für Verbindungen . . . . .	76
3.4.1. Verbindungsinformationen auf Ebene des Zusammenbaus . . . . .	76
3.4.2. Verbindungsinformationen auf Ebene der Einzelteile . . . . .	78
3.5. Absicherung von Verbindungen . . . . .	79
3.5.1. Simulation . . . . .	79
3.5.2. Digitale Baubarkeit . . . . .	82
3.6. Fazit . . . . .	85
<b>4. Verbindungen im Produktentstehungsprozess</b>	<b>87</b>
4.1. Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie . . . . .	87
4.1.1. Entwicklung von Verbindungen . . . . .	89
4.1.2. Absicherung von Verbindungen . . . . .	90
4.2. Methoden . . . . .	91
4.2.1. Erstellung von festen Verbindungen . . . . .	91
4.2.2. Dokumentation von Verbindungen . . . . .	93
4.2.3. Digitale Werkzeugabsicherung . . . . .	95
4.3. Systeme . . . . .	103
4.3.1. CAD-System . . . . .	104
4.3.2. PDM-System . . . . .	105
4.3.3. CAP-System . . . . .	108
4.4. Informationen . . . . .	108
4.5. Fazit . . . . .	113
<b>5. Defizite und Handlungsfelder</b>	<b>115</b>
5.1. Dokumentation von festen Verbindungen . . . . .	115
5.2. Erhöhung der Datenqualität . . . . .	117
5.3. Unterstützung der kontextorientierten, digitalen Absicherung . . . . .	118

5.4.	Datenbereitstellung im Produktentstehungsprozess . . .	121
5.5.	Fazit . . . . .	121
<b>6.</b>	<b>Konzeption</b>	<b>123</b>
6.1.	Positionierung von Verbindungshilfsmitteln . . . . .	126
6.1.1.	Vorpositionierung . . . . .	127
6.1.2.	Feinpositionierung . . . . .	128
6.1.3.	Mehrfachpositionierung . . . . .	132
6.2.	Dokumentation fester Verbindungen . . . . .	132
6.2.1.	Verbindungsobjekt . . . . .	133
6.2.2.	Verbindungsinformationen . . . . .	135
6.2.2.1.	Allgemeine Verbindungsinformationen .	136
6.2.2.2.	Kontextabhängige Verbindungsinforma- tionen . . . . .	140
6.2.3.	Verbindungsstruktur . . . . .	143
6.3.	Digitale Absicherung fester Verbindungen . . . . .	148
6.3.1.	Relation zwischen Produkt und x-System . . . .	149
6.3.2.	Kontext der digitalen Absicherung . . . . .	150
6.3.3.	Prozess der digitalen Absicherung . . . . .	153
6.4.	Fazit . . . . .	157
<b>7.</b>	<b>Prototypische Umsetzung und kritische Bewertung</b>	<b>159</b>
7.1.	Erstellung von Verbindungen . . . . .	159
7.1.1.	Grobpositionierung . . . . .	161
7.1.2.	Feinpositionierung . . . . .	162
7.1.3.	Mehrfachpositionierung . . . . .	163
7.2.	Dokumentation von Verbindungen . . . . .	164
7.2.1.	Verbindungsassistent . . . . .	166
7.2.2.	Verbindungsobjektdialog . . . . .	167

7.3. Kontextorientierte Absicherung . . . . .	173
7.3.1. Klärung der Aufgabenstellung . . . . .	173
7.3.2. Erstellung der Simulationsszene . . . . .	177
7.3.3. Experimentplanung . . . . .	178
7.3.4. Simulationsexperiment . . . . .	180
7.3.5. Auswertung . . . . .	182
7.4. Kritische Bewertung . . . . .	184
7.4.1. Dokumentation von festen Verbindungen . . . . .	184
7.4.2. Erhöhung der Datenqualität . . . . .	185
7.4.3. Unterstützung der kontextorientierten, digitalen Absicherung . . . . .	187
7.4.4. Datenbereitstellung im Produktentstehungsprozess	189
7.5. Fazit . . . . .	190
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>193</b>
8.1. Zusammenfassung . . . . .	193
8.2. Ausblick . . . . .	195
<b>A. Beispiele für einfache Verbindungsarten</b>	<b>199</b>
<b>B. Beispiele für kombinierte Verbindungen</b>	<b>203</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>205</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>221</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>227</b>



# 1. Einleitung

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die vorliegende Arbeit. Dabei wird der Hintergrund erläutert und anschließend auf die Problemstellung, die Zielsetzung sowie die Vorgehensweise dieser Arbeit eingegangen. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einem Überblick über den Aufbau.

## 1.1. Hintergrund

In den vergangenen Jahrzehnten lässt sich ein Wandel der Märkte beobachten. Insbesondere im Bereich der Automobilindustrie findet, getrieben durch die gehobenen Ansprüche der Kundschaft, ein Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt statt. War der Kunde in der Vergangenheit noch mit wenigen Produktvarianten zufriedenzustellen, ist heutzutage ein breites Spektrum von Ausstattungspaketen und Optionen gefragt, welches kaum noch zu überblicken ist [BDV<sup>+</sup>03, ES09]. Ein Großteil dieser Produktvarianz ist auf die stetig wachsende Zahl von Produktinnovationen zurückzuführen. Gerade im Bereich der Automobilindustrie sind Unternehmen bestrebt, sich durch innovative Produkte von der Konkurrenz abzuheben. Insbesondere im Segment der Sicherheits- und Assitenzsysteme wurde in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Warn- und Präventionssystemen entwickelt [SI08]. So kann auch ein großer Teil der erwirtschafteten Gewinne auf die Einführung

von Produktinnovationen zurückgeführt werden [NN09, ES05, HB08]. Gleichzeitig lassen sich durch Innovationen innerhalb der eigenen Entwicklungs- und Produktionsprozesse ebenfalls große Einsparpotentiale erschließen, welche den Unternehmenserfolg nachhaltig sichern [Wil10].

Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der Schnellebigkeit heutiger Produkte. Diese zwingt Unternehmen die Time-To-Market, also die Zeitspanne von der ersten Produktidee bis zum fertigen Produkt, welches an den Kunden ausgeliefert wird, permanent zu verkürzen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig zu sichern [BW96, FG08, HB08].

Das Spektrum der Entwicklungstätigkeiten reicht dabei von Produktänderungen und -anpassungen (z.B. Facelift) bis hin zu innovationsgetriebenen Entwicklungen, wie etwa Brennstoffzellen- oder Hybridantriebe. Parallel dazu wird die Entwicklung auch mit einer Vielzahl von internen und externen Einflüssen konfrontiert, denen sie gerecht werden muss, wie zum Beispiel Veränderungen der Gesetzeslage (z.B. Crash Sicherheit, CO<sub>2</sub>-Ausstoß) [Lin07].

Zur Reduzierung der Produktentstehungszeit sind insbesondere die Anwendung simultaner Arbeitsweisen sowie der Einsatz digitaler Softwarewerkzeuge und Techniken zu nennen. Simultane Arbeitsweisen zielen auf eine Parallelisierung von Prozessschritten zur Bearbeitung bestimmter Aufgaben ab [SAKR05a, SAKR05b]. Die Zielsetzung für den Einsatz digitaler Werkzeuge und Techniken besteht im Wesentlichen darin, möglichst viele Entwicklungs- und Prüfschritte anhand virtueller Produktmodelle nachvollziehen zu können. Die damit einhergehende Senkung der Anzahl benötigter realer Prototypen für Produkte und Produktionseinrichtungen führt somit nicht nur zu einer Reduktion der Entwicklungszeit, sondern auch zu erheblichen Kostenvorteilen [Döb08, Wac11]. Zu den Herausforderungen einer virtuellen

Produktentwicklung gehört auch der konsequente Aufbau einer digitalen Produktbeschreibung. Diese dient sowohl zur Integration als auch zur Steuerung digitale Untersuchungen über das gesamte Produktleben [DS06]. Damit steigen aber auch die Anforderungen an die Qualität der zugrundeliegenden Daten, Informationssysteme und Unternehmensprozesse [BVD<sup>+</sup>04].

Produktentwicklungsprozesse sind immer stärker durch ineinandergreifende und simultan verlaufende Entwicklungsphasen gekennzeichnet [PBF07]. Die dabei anfallenden und zu verarbeitenden Daten und Informationen sind aufgrund ihrer großen Menge und Komplexität nicht ohne den Einsatz digitaler Werkzeuge beherrschbar. Will man in Zukunft verstärkt Produkte vollständig in der digitalen Welt entwickeln und ihre Herstellungs- und Gebrauchseigenschaften frühzeitig testen, ist eine tiefgreifendere informationstechnische Unterstützung notwendig [DS06].

## 1.2. Problemstellung

Diese Arbeit entstand in der Forschungsabteilung eines deutschen Automobilherstellers, welche sich mit der integrierten Betrachtung des Produktes und der zugehörigen Produktionssysteme während der Produktentstehung beschäftigt. Die angesprochene Reduzierung realer Fahrzeugaufbauten und Produktionseinrichtungen gehört hier zu den wesentlichen Strategien zur Senkung der Entwicklungszeit und -kosten. Gerade die Finanzkrise ab 2008 hat entscheidend dazu beigetragen, verstärkt digitale Arbeitsweisen in den Entwicklungsprozess zu integrieren, um langfristig von den hohen Kostensenkungspotentialen zu profitieren. Technische Produkte sind aus einer Vielzahl von Einzel-

teilen und Baugruppen zusammengesetzt. Ihre Aufteilung kann aus unterschiedlichen Gründen notwendig sein (z.B. Montage, Demontage, Fertigung, Funktion). Um die funktionalen Beziehungen zwischen den Einzelteilen und Baugruppen herstellen und gewährleisten zu können, müssen diese durch geeignete Maßnahmen wieder zusammen gebracht werden. Diese Aufgabe wird konstruktiv durch Verbindungen (z.B. mechanisch oder elektrisch) gelöst [Rot96, AOK80]. Die Klasse der mechanischen Verbindungen stellt wichtige Elemente einer Konstruktion dar [Rot96]. Am Beispiel der metallverarbeitenden Industrie hat man ermittelt, dass über 50% der Produktionszeit und ein noch höherer Anteil an den Produktionskosten für das Verbinden von Einzelteilen zu höherwertigen Einheiten und Baugruppen aufgewendet wird [Bau91]. Dementsprechend haben mechanische Verbindungen nicht nur eine hohe technische, sondern auch eine hohe wirtschaftliche Relevanz für das gesamte Produkt [UDGG01]. Betrachtet man den Lebenslauf von Verbindungen, so lässt sich feststellen, dass diese in jeder Phase des Produktlebens, von der Entwicklung über die Herstellung, im Betrieb bis zum Recycling des Produktes eine Rolle spielen. Neben funktionalen Aspekten sind Verbindungen auch aus haftungsrechtlicher Sicht mit besonderer Sorgfalt zu behandeln [MG11, VDI99b]. Letztlich verlangt auch die Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen<sup>1</sup> ein ordnungsgemäßes Recycling der Altfahrzeuge. Daher trägt auch eine gute Demontierbarkeit des Produktes zur Senkung von Folgekosten bei. Das Produktdesign beeinflusst nahezu alle Bereiche des späteren Produktlebens [PBF07]. Gerade vor dem Hintergrund immer stärker ansteigender Produktvarianz und der Einführung neuer Produktinnovationen steht zu Beginn

---

<sup>1</sup>Altfahrzeug-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Juni 2002 (BGBl. I S. 2214), die durch Artikel 5 Absatz 18 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist, <http://www.gesetze-internet.de/altautov>

einer Produktentwicklung in der Regel noch recht wenig Erfahrung in der Herstellung, dem Zusammenbau bzw. der Demontage dieses Produktes zur Verfügung [RB08]. Daher spielen Analyse und Validierung fester Verbindungen in den frühen Phasen der Produktentwicklung hinsichtlich Montage-, Wartungs- und Reparaturbelange eine immer bedeutendere Rolle. Dadurch lassen sich frühzeitig Kosten für spätere Änderungen und Anpassungen während Produktion oder Betrieb des Produktes vermeiden [LW06,SKR10]. Ein Großteil dieser Untersuchungen findet bereits heute anhand von digitalen Modellen statt, Tendenz steigend [Bär08,RB08].

### **1.3. Zielsetzung**

Im Rahmen dieser Arbeit werden Entwicklungs- und Herstellungsprozesse von mechanischen Bauteilverbindungen betrachtet. Diese eher klassischen Maschinenelemente haben nicht nur einen entscheidenden Einfluss auf die Sicherheit und Qualität des Produktes, sondern auch auf viele Prozesse entlang des Produktlebens. Dennoch werden Bauteilverbindungen vielfach stiefmütterlich behandelt [Vie05]. Dies führt dazu, dass Verbindungsinformationen in den frühen Phasen der Produktentstehung nicht in ausreichender Güte zur Verfügung stehen. Die Absicherung unterschiedlicher Aspekte des Produktlebens (z.B. Produktion, Wartung, Recycling) kann damit nicht in ausreichendem Maß gewährleistet werden. Daher befasst sich diese Arbeit mit der Dokumentation und Wiederverwendung kontextabhängiger Verbindungsinformationen im Produktentstehungsprozess. Den Schwerpunkt bilden feste lösbare und feste nicht-lösbare Verbindungen sowie deren kontextabhängige Absicherung im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie.

## 1.4. Vorgehensweise

Um die komplexen Zusammenhänge innerhalb eines Produktentstehungsprozesses besser beschreiben zu können, ist es sinnvoll eine Trennung einzelner Aspekte vorzunehmen.

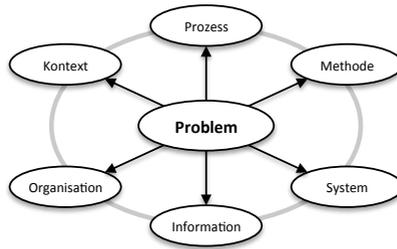


Abbildung 1.1.: Vorgehensmodell zur Beschreibung eines Problems

Hierbei hat sich die Aufteilung aus Abbildung 1.1 als sinnvoll erwiesen [Sve03, Vie05, Mül07, BC09, Mei10]. Auch wenn diese Darstellung einer transparenten Beschreibung dienlich ist, darf nicht unerwähnt bleiben, dass in der Realität starke Abhängigkeiten und Wechselwirkungen vorhanden sind. Nachfolgend wird erläutert, welches Grundverständnis den einzelnen Aspekten im Rahmen dieser Arbeit zugrunde gelegt wird.

### 1.4.1. Prozess

**Definition.** *DIN 9000 [DIN87] definiert Prozess als ein Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt. Dabei können die Eingaben für einen Prozess auch die Ergebnisse anderer Prozesse sein.*

Ein Prozess setzt sich also aus einer nicht begrenzten Folge von Aktivitäten bzw. Funktionen zusammen, die in Wechselbeziehung zueinander stehen können. Diese dienen der Umformung, Speicherung oder dem Transport von Materie, Energie oder Informationen in einem System. Die einzelnen Aktivitäten sind inhaltlich abgeschlossen und stehen in einem logischen Zusammenhang zueinander [VDI02, VDI00]. In der Simulationstechnik wird ein Prozess auch als eine Folge von zusammengehörenden Ereignissen in einem Zustandsraum, welche sich auf ein bestimmtes Modellelement bezieht, verstanden. Somit lässt sich durch eine zweckmäßige Anordnung einzelner Prozessschritte ein stetiger Informationsgewinn auf Basis bereits generierter Erkenntnisse bewerkstelligen [VDI96].

### 1.4.2. Methode

**Definition.** *Eine Methode stellt ein „planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels“ dar [VDI04b].*

Eine Methode kann als eine Arbeitsabfolge verstanden werden, welche auch durch konkrete Handlungsanweisungen ergänzt sein kann. Diese stammen beispielsweise aus der Denkpsychologie oder haben sich aus Erfahrungen in unterschiedlichen Anwendungen ergeben [PBF07]. Während der Prozess beschreibt, was während der Produktentstehung zu geschehen hat, wird durch Methoden beschrieben, wie dieses Ziel erreicht werden soll. Dies kann beispielsweise im Fall der Konstruktionsmethodik VDI 2221 [VDI93] dadurch geschehen, dass für die Vielzahl der zu lösenden Probleme ein allgemeiner Problemlösungsprozess auf den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess übertragen und angewendet wird. Für die Bearbeitung der einzelnen Prozessschritte wiederum

stehen dann unterschiedliche Methoden zur Verfügung, mit denen konkrete Probleme gelöst werden können. Innerhalb der Produktentstehung in der Automobilindustrie kommen verschiedene Methoden zum Einsatz. Diese wirken sich entweder auf das organisatorische Zusammenspiel der verschiedenen Fachbereiche und Disziplinen aus, wie etwa Concurrent Engineering oder Simultaneous Engineering (siehe Kapitel 2.1.2 auf Seite 22). Oder es handelt sich um Methoden, die einzelne Arbeitsschritte unterstützen und sich an den vorhandenen Informationen und Informationssystemen orientieren, wie zum Beispiel Digital Mock-Up.

### 1.4.3. System

**Definition.** *Ein System beschreibt eine Gesamtheit von geordneten Elementen, wie etwa Funktionen oder technischen Gebilden. Diese Elemente sind durch Relationen miteinander verknüpft und durch eine Systemgrenze von der Umwelt abgegrenzt [PBFG07, VDI96].*

Im Rahmen dieser Arbeit werden vorrangig informationstechnische Systeme (IT-Systeme) betrachtet. Diese dienen der Erzeugung, Speicherung, Verarbeitung und Verteilung von Informationen [Döb08, VDI02]. Dabei werden zwei Klassen von Systemen unterschieden:

- Autorensysteme
- Verwaltungssysteme

Zur Klasse der Autorensysteme zählen Systeme zur Erzeugung und Bearbeitung von Informationen. Im Bereich der Produktentwicklung sind das vor allem Konstruktions- und Berechnungssysteme. Diese sind

für spezifische Aufgabenstellungen entwickelt und optimiert [VWBZ09]. Darüber hinaus existiert auch eine Vielzahl an Büroanwendungen, mit deren Hilfe, neben den reinen Produktdaten, zusätzliche Dokumente wie etwa Projekt- und Arbeitspläne erzeugt werden. Zur Klasse der Verwaltungssysteme zählen alle jene Systeme die zum Speichern, Verwalten und Verteilen von Informationen eingesetzt werden. Im Bereich der Produktentwicklung spielen insbesondere Produktdatenmanagementsysteme (PDM-Systeme) eine wichtige Rolle [FG08, VDI06, ES09].

#### 1.4.4. Information

**Definition.** *Die Richtlinie VDI2219 definiert Information als ein „Datum, das einen Zweck hat und zielgerichtet ist“ [VDI02].*

Im Rahmen des Produktentstehungsprozesses werden permanent Informationen zwischen Personen oder Systemen ausgetauscht. Informationen können sowohl als Eingangs- als auch als Ausgangsgröße eines Prozessschrittes definiert werden (z.B. Fertigungsunterlagen) oder der Kommunikation zwischen einzelnen Prozessschritten dienen. Gerade durch die hohe Rechnerunterstützung in heutigen Produktentstehungsprozessen werden hohe Anforderungen an die verlustfreie Übertragung von Informationen zwischen Prozessen und Disziplinen gestellt. Informationen sind damit eine wesentliche Schlüsseleigenschaft von Entwicklungsprozessen, wenn es darum geht Prozessverbesserungen zu entwickeln.

### 1.4.5. Organisation

**Definition.** *Nach VDI2219 wird eine Organisation als ein Regelsystem definiert, mit dem Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten von Personen festgelegt werden. Diese Personen haben entsprechende Rollen und Berechtigungen, um ihre Aufgaben im Unternehmen wahrzunehmen [VDI02].*

Dieses Zusammenspiel wird im Wesentlichen durch zwei Organisationsformen beschrieben:

- Aufbauorganisation
- Ablauforganisation

Die Aufbauorganisation gliedert ein Unternehmen in hierarchische Teilsysteme und regelt deren Beziehungen untereinander. Betrachtet man also die Strukturierung eines Betriebs oder soziotechnischen Systems als statische Struktur, so werden die Regeln zu deren Bildung und internen Verknüpfung als Aufbauorganisation bezeichnet [Ehr07, Sch97]. Die Ablauforganisation wiederum regelt das räumliche und zeitliche Zusammenspiel von Menschen, Betriebs- und Arbeitsmitteln innerhalb einer organisatorischen Einheit [Bet91]. Dadurch lassen sich komplexe Abläufe durch eine arbeitsteilige Zuordnung auf unterschiedliche Mitarbeiter verteilen. Diese werden dadurch in die Lage versetzt, gegen Ende eines Produktstehungsprozesses, zu einem bestimmten Zeitpunkt ein hochwertiges Produkt zu erstellen. Damit bildet die Aufbauorganisation sowohl den Rahmen für den Entwicklungsprozess als auch für die unterstützende IT-Infrastruktur. Deren Entwurf orientierte sich in der Vergangenheit vielfach an der weit verbreiteten funktionalen Aufbauorganisation [Sch97].

### 1.4.6. Kontext

**Definition.** *Kontext beschreibt die Summe der äußeren Einflüsse, die sich in einer bestimmten Situation auf eine Entität auswirken.*

In der Softwareentwicklung beschreibt der Kontext Aspekte der lokalen Umwelt eines Benutzers. Er beinhaltet jede Art von Information, die der Beschreibung der Situation einer Entität dient. Relevante Informationen zur Beschreibung eines Kontextes sind Kontextmerkmale oder Kontextinformationen, welche innerhalb eines bestimmten Gültigkeitsbereich verwendet werden [Ber10, Gör05]. Bezogen auf ein Unternehmen beschreibt der Kontext alle äußeren Einflussfaktoren, die sich auf ein Unternehmen und dessen Prozesse auswirken, wie etwa Markt, Gesetzgebung oder die gesellschaftliche Situation [Mül07]. Innerhalb des Produktentstehungsprozesses beschreibt der Kontext unterschiedliche Einflüsse, die sich aufgrund der verschiedenen Lebensphasen auf die Gestalt und den Zusammenbau eines Produktes auswirken (z.B. Serienproduktion, Wartung oder Recycling) [RWPM09].

## 1.5. Aufbau der Arbeit

Wie in Abbildung 1.2 dargestellt, ist diese Arbeit in die folgenden Kapitel gegliedert.

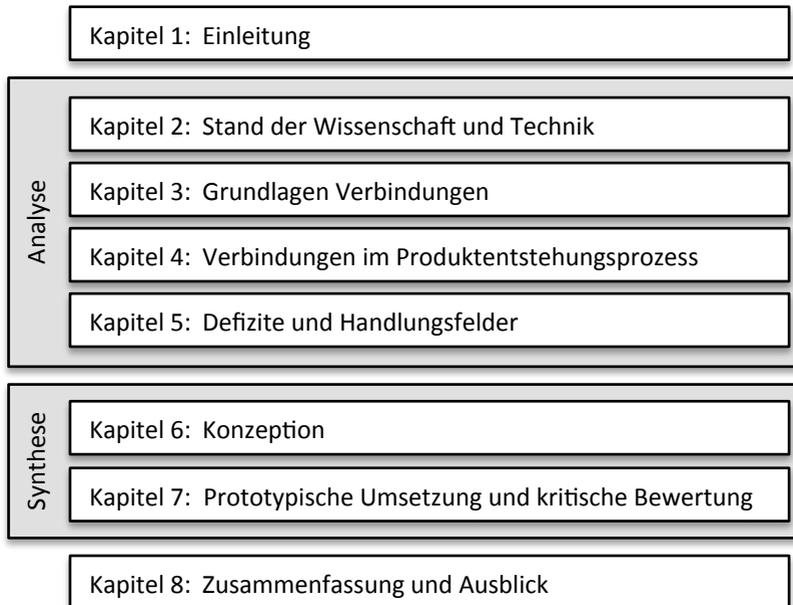


Abbildung 1.2.: Aufbau der Arbeit

### **Kapitel 1 - Einleitung**

Das erste Kapitel beschreibt den Hintergrund, die Problemstellung und die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit. Darüber hinaus wird das Forschungsverständnis definiert, wonach Prozesse, Methoden, IT-Systeme, Informationen, die Organisation und der Kontext zur umfassenden Beschreibung eines Problems betrachtet werden.

### **Kapitel 2 - Stand der Wissenschaft und Technik**

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik, bezogen auf die Entwicklung und Absicherung von Produkten. Neben einem allgemeinen Überblick über den Produktentstehungsprozess wird im Speziellen auf die Dokumentation und Wiederverwendbarkeit von Verbindungsinformationen in den Systemen der Produktentwicklung eingegangen.

### **Kapitel 3 - Grundlagen Verbindungen**

Kapitel 3 betrachtet den Hintergrund der verbindungsorientierten Produktentwicklung und definiert diese. Dazu wird der Begriff „Verbindung“ definiert und die verschiedenen Ausprägungen von Verbindungen diskutiert. Dabei steht die Entwicklung und Absicherung von Verbindungen im Kontext des Produktentstehungsprozesses im Vordergrund.

### **Kapitel 4 - Verbindungen im Produktentstehungsprozess**

Kapitel 4 beschreibt die Entwicklung und Absicherung von Verbindungen am Beispiel eines Produktentstehungsprozesses der Automobilindustrie. Dabei wird der Entwicklungsprozess an sich, sowie die Handhabung von Informationen für die Absicherung unterschiedlicher Lebensphasenaspekte dargestellt. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Erarbeitung einer System- und Prozessverbesserung.

### **Kapitel 5 - Defizite und Handlungsfelder**

Zusammenfassung der Handlungsfelder, die sich aufgrund der Erkenntnisse aus Kapitel 3 und Kapitel 4 ergeben. Diese dienen als Basis für die weitere Konzeption.

### **Kapitel 6 - Konzeption**

Dieses Kapitel beschreibt das Konzept zur Verbesserung der vorliegenden Situation im Sinne einer verbindungsorientierten Produktentwicklung. Schwerpunkte sind die Verbesserung der Dokumentation von Verbindungen, sowie die durchgängige Wiederverwendbarkeit von Verbindungsinformationen und kontextabhängigen Absicherungsinformationen im Produktentstehungsprozess.

### **Kapitel 7 - Prototypische Umsetzung und kritische Bewertung**

Kapitel 7 beschreibt die Umsetzung des in Kapitel 6 vorgestellten Konzepts und unterzieht dieses einer kritischen Bewertung.

### **Kapitel 8 - Zusammenfassung und Ausblick**

Dieses Kapitel gibt eine zusammenfassende Darstellung dieser Arbeit wieder und beschreibt weiterführende Forschungsbedarfe, die sich aufgrund der hier gewonnen Erkenntnisse ergeben.

## **2. Stand der Wissenschaft und Technik**

Das nachfolgende Kapitel befasst sich mit den Grundlagen der Produktentstehung. Dabei wird auf die relevanten Prozesse und Methoden eingegangen, die dieser Arbeit zugrunde liegen. Zusätzlich werden Informationen und die entsprechenden Informationssysteme betrachtet, die zur Erzeugung und Verwaltung dieser Informationen eingesetzt werden. Darüber hinaus wird erläutert, wie sich die Organisation und der Kontext auf die Entwicklung von Produkten auswirken.

### **2.1. Produktentstehungsprozess**

Die Zeitspanne von der ersten Idee, über Entwicklung, Herstellung und Nutzung, bis zur Ablösung durch ein Nachfolgeprodukt wird in mehrere Phasen unterteilt. Diese werden als Lebensphasen eines Produktes bezeichnet. Abhängig von Branche und Produktart können einzelne Phasen unterschiedlich organisiert sein, prinzipiell werden jedoch die gleichen Phasen durchlaufen [FG08, Lin07, VDI93, Rau11]. Abbildung 2.1 zeigt ein typisches Produktleben, wie er auf die meisten Produktarten zutrifft. Der Lebenslauf eines Produktes beginnt mit der ersten Idee und der Planung des Produktes (Systemvorstudie).

Getrieben durch Aufträge, Marktanalysen, Kundenanforderungen, aktuelle und zukünftige Gesetzesvorlagen sowie die Unternehmensstra-

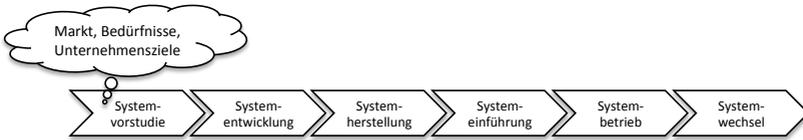


Abbildung 2.1.: Produktlebensphasen

tegie werden die entscheidenden Produktmerkmale (z.B. Architektur, Design, Materialien) festgelegt. Der Lebenslauf eines Produktes beginnt mit der ersten Idee und der Planung des Produktes (Systemvorstudie). Getrieben durch Aufträge, Marktanalysen, Kundenanforderungen, aktuelle und zukünftige Gesetzesvorlagen sowie die Unternehmensstrategie werden die entscheidenden Produktmerkmale (z.B. Architektur, Design, Materialien) festgelegt. Daran schließt sich die Phase der Systementwicklung an. In dieser Phase wird der Produktentwurf und das Design erarbeitet. Dabei werden die Produktmerkmale derart festgelegt, dass die Herstellung gemäß den Projektvorgaben (z.B. Kosten, Stückzahl) und die Nutzung durch den Kunden gewährleistet ist [EKL07]. In diese Phase fallen auch alle Arbeitsschritte, die beispielsweise die Aufnahme der regulären Produktion vorbereiten. Daher startet in dieser Phase - mit einem geringen zeitlichen Versatz - bereits auch die Planung der Produktionsanlagen [Bur08, ES09].

Die Systementwicklung endet schließlich mit dem sukzessiven Anlauf der Produktionsanlagen und dem ersten Produkt, welches auf den Serienanlagen hergestellt wird. In den Phasen der Systemherstellung und Systemeinführung werden kontinuierlich Verbesserungen an den bestehenden Produktionsanlagen und dem herzustellenden Produkt vorgenommen.

Im Anschluss an die Produktionsphase erfolgt die Einführung des Produktes auf dem Markt sowie dessen Nutzung durch den Kunden (Systembetrieb). Ist das Produkt letzten Endes nicht mehr gebrauchsfähig, erfolgt der Systemwechsel (Recycling). Hier werden Schadstoffe entsorgt und wiederverwertbare Materialien und Komponenten einer Aufbereitung zugeführt, um diese einer weiteren Verwendung oder einer Verwertung zur Verfügung zu stellen. Unter einem Produktentstehungsprozess wird ein geregelter Prozess verstanden, an dessen Ende ein funktionsfähiges und herstellbares Produkt entsteht [Pul04]. Durch die Festlegung der Produktmerkmale wird während der Produktgestaltung der größte Anteil der später anfallenden Kosten für Herstellung und Betrieb des Produktes festgelegt [Gai81, VDI04b]. Teilweise wird bei der Beschreibung des Produktentstehungsprozesses auch die Produktion mit einbezogen, da erst ab diesem Zeitpunkt ein an den Kunden auslieferbares Produkt zur Verfügung steht [VDI93]. Im Rahmen der integrierten Produktentwicklung endet diese Phase mit der Freigabe der Fertigung, also bevor die tatsächliche Serienproduktion beginnt. Zu diesem Zeitpunkt liegen alle benötigten Informationen bezüglich der zukünftigen Produktlebensphasen widerspruchsfrei in digitaler Form vor [SAKR05a, VWBZ09]. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Produktentstehungsprozess folgendermaßen definiert.

**Definition.** *Der Produktentstehungsprozess bildet eine Teilmenge des Produktlebens und erstreckt sich über die Phasen Produktplanung, Entwicklung und Prozessplanung.*

Die integrierte und überlappende Gestaltung von Produkt und Produktionsprozess (siehe Abbildung 2.2) hilft, die Time-to-Market zu verkürzen, wodurch die Entwicklungs- und Herstellkosten reduziert und die Produktqualität umfassend verbessert wird [ES05, BW96].

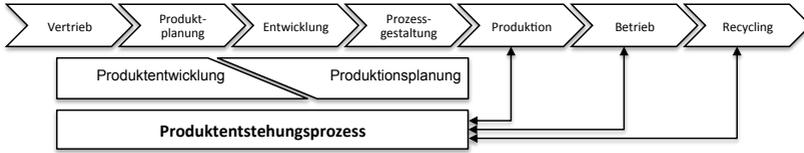


Abbildung 2.2.: Einordnung des Produktentstehungsprozesses in den Produktlebenslauf [ES09]

In Abhängigkeit des Produktes und des Unternehmens wird der Produktentstehungsprozess nach eigenen Randbedingungen gestaltet. Die Zeitspanne für Entwicklung und Planung von Produkten, die in hohen Stückzahlen und mit vielen Varianten hergestellt werden, ist üblicherweise länger als für kundenspezifische Einzelanfertigungen [PBF07]. In der Automobilindustrie beträgt die Dauer eines Entwicklungsprojektes zwischen drei und fünf Jahren [Web09]. Hierbei spielt die Planung der Produktionsanlagen eine große Rolle, da diese bei großen Stückzahlen auf eine hohe Automatisierung und Stückzahlausbringung hin optimiert werden. Im Gegensatz dazu werden beispielsweise Güter des Anlagen- und Maschinenbaus stark kundenindividuell entwickelt und häufig in wesentlich kleineren Stückzahlen produziert. Deren Herstellung ist in der Regel mit einem geringeren Automatisierungsgrad verbunden, so dass sich die Dauer für Entwicklung und Planung auf einige Monate oder Wochen reduzieren kann [LW06]. Einen weiteren Einfluss auf die Dauer des Produktentstehungsprozesses ergibt sich aus dem Verwendungszweck und der Nutzungsdauer eines Produktes. Die Nutzungsdauer kann sich von einem einzelnen Einsatz (z.B. Einwegspritzen) bis hin zu mehreren Jahrzehnten (z.B. Automobil, Flugzeug, Kraftwerk) erstrecken. Langlebige Produkte bedürfen während ihres

Betriebs festgelegte Aufwände für die Instandhaltung<sup>1</sup>, welche bei der Entwicklung des Produktes zu berücksichtigen sind. Dadurch ist eine ganzheitliche Sichtweise, d.h. die Berücksichtigung von Anforderungen aus allen Lebensphasen, während der Entwicklung eines Produktes notwendig [SAKR05b,SAKR05a,PBFG07].

### 2.1.1. VDI 2221

Die Konstruktionswissenschaft hat das Bestreben, mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden den Aufbau technischer Systeme und deren Beziehungen zu ihrer Umwelt zu analysieren und zu beschreiben (Theorie technischer Produkte und Systeme). Aus den erkannten Zusammenhängen werden anschließend Regeln zur Bildung technischer Systeme abgeleitet (Konstruktionsmethodik). Die Konstruktionsmethodik hat somit den Anspruch, eine geplante Vorgehensweise mit konkreten Handlungsanweisungen zur Entwicklung technischer Systeme bereitzustellen. Diese Anweisungen ergeben sich sowohl aus den Erkenntnissen der Konstruktionswissenschaft und der Denkpsychologie als auch aus den Erfahrungen in unterschiedlichen Anwendungen [PBFG07]. Die Entwicklung der heute in Deutschland gängigen Konstruktionsmethoden hat eine lange Tradition und lässt sich bis in die 1950er Jahre zurückverfolgen [Han55, VWBZ09, PBFG07, Pul04]. Die im deutschsprachigen Raum weit verbreitete VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte“ schlägt dazu ein weitestgehend branchenunabhängiges Vorgehensmodell auf Basis eines systemtechnischen Problemlösungszyklus vor (siehe Abbildung 2.3).

---

<sup>1</sup>Instandhaltung bildet einen Sammelbegriff für technische Maßnahmen zum Erhalt bzw. zur Wiederherstellung des funktionsfähigen Zustandes eines Produktes und umfasst Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung [DIN12,DIN10].

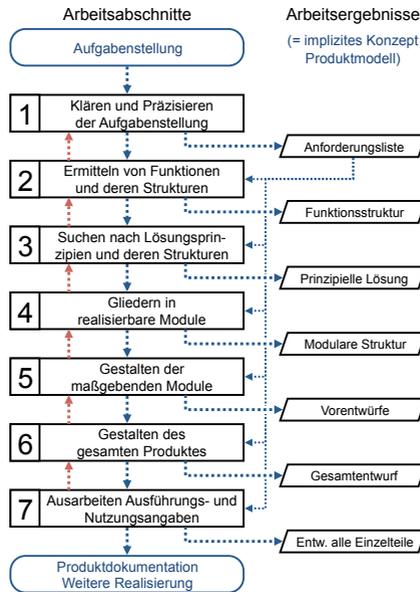


Abbildung 2.3.: Systemtechnischer Problemlösungszyklus, nach VDI 2221 [VDI93]

Mit Hilfe dieser Vorgehensweise erfährt der Konstrukteur eine systematische Unterstützung bei der Suche nach Lösungen, während der Gestaltung des Produktes. Die methodische Vorgehensweise liefert zwar keine konkreten Lösungsvorschläge, hilft aber, den Konstruktionsprozess zu gestalten [VWBZ09]. Während der Problemlösung sind die Eigenschaften eines Produktes so festzulegen, dass diese den vorgegebenen Anforderungen, beispielsweise des Marktes oder des Kunden, genügen [Fis08]. Das Festlegen dieser Eigenschaften erfolgt während der Produktgestaltung in einer iterativen Abfolge aus Synthese- und Analyse-schritten, bis der gewünschte Endzustand erreicht ist. Beim Durchlau-

fen des Konstruktionsprozesses sind für jedes Problem immer wieder neue Lösungsvarianten zu ermitteln, auszuwählen und deren Eigenschaften anhand der gegebenen Anforderungen zu bewerten. Je nach Art und Komplexität des vorliegenden Problems kann ein wiederholtes Durchlaufen von Teilen oder des gesamten Prozesses notwendig sein [VDI04a].

**Definition.** *Ein Problem liegt dann vor, wenn ein unerwünschter Ausgangszustand in einen erwünschten Endzustand überführt werden soll [PBF07].*

Bezogen auf das zu lösende Problem lassen sich drei Arten von Konstruktionsaufgaben unterscheiden [PBF07, VWB09]:

- **Neukonstruktion:**

Probleme werden mit Hilfe neuartiger oder der Kombination bereits bekannter Lösungsprinzipien gelöst, so dass ein vollständig neues Produkt entsteht.

- **Variantenkonstruktion:**

Innerhalb vorgegebener Grenzen wird durch die Änderung bestimmter Merkmale (z.B. Material, Farbe, Gestalt) eine Variation der prinzipiellen Lösung vorgenommen.

- **Anpassungskonstruktion:**

Anpassung der Merkmale eines Produktes an geänderte Randbedingungen, bei gleichzeitiger Erhaltung der bereits realisierten Lösungsprinzipien.

Im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie wird ein Produkt nicht von Grund auf neu konstruiert. Fahrzeugprojekte sind durch eine hohe Anzahl von Übernahmeteilern und der Wiederverwendung von

bekanntesten Konzepten geprägt. Daher handelt es sich hierbei vorrangig um Varianten- und Anpassungskonstruktionen [Jan04]. Dennoch kommt das iterative Vorgehen, sowie die systematische Lösungssuche bei der Entwicklung von einzelnen Fahrzeugkomponenten immer wieder zu Anwendung.

### 2.1.2. Integrierte Produktentwicklung

Die enge Kopplung einzelner Fachdisziplinen während der Produktentwicklung wird durch die VDI-Richtlinie 2221 nicht vollständig beschrieben. Daher wurden in den vergangenen Jahren wissenschaftliche Ansätze entwickelt, die auf die hohe Parallelisierung und Arbeitsteilung im Produktentstehungsprozess eingehen. Zu nennen sind hier Methoden wie die Integrierte Produktentwicklung, Simultaneous Engineering oder Concurrent Engineering [GSAM97,ZLF98,BDVW04,VKH06]. Das Modell der Integrierten Produktentwicklung zeigt allgemeine Rollen und Arbeitsschritte, die bei der Entwicklung eines Produktes vorzufinden sind (Abbildung 2.4).

Dabei wird ein optimales Zusammenspiel von Marketing, Produktentwicklung und Produktion angestrebt. Darüber hinaus befasst sich die Integrierte Produktentwicklung auch mit der Integration der stark arbeitsteiligen Organisation innerhalb der Produktentwicklung. Damit fokussiert sich dieser Ansatz nicht nur auf die rein technische Lösung des vorliegenden Problems, sondern auch auf alle dazugehörigen Abläufe [And87,VWBZ09,Ehr07]. Das Modell der Integrierten Produktentwicklung stellt eine idealisierte Sichtweise dar, die prinzipiell auf jede Produktentwicklung übertragbar ist. Unter Simultaneous Engineering oder Concurrent Engineering wird eine zielgerichtete, interdisziplinäre so-

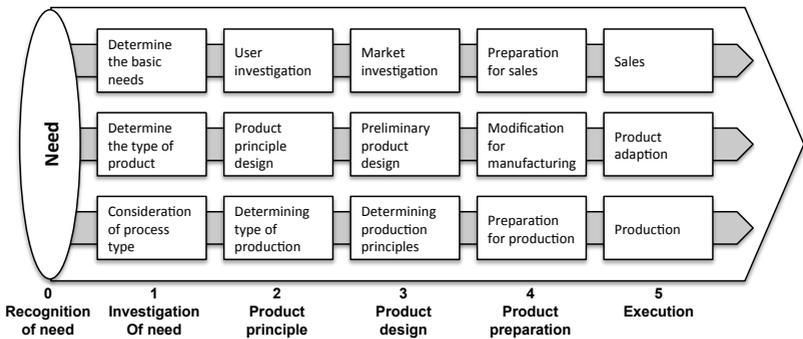


Abbildung 2.4.: Modell der Integrierten Produktentwicklung [And87]

wie integrierte und zeitlich parallele Produkt- und Prozessgestaltung verstanden. Concurrent Engineering ist eine sehr direkte Form der Zusammenarbeit. Dabei werden die Abhängigkeiten unterschiedlicher Teilaufgaben berücksichtigt und gebündelt betrachtet. Simultaneous Engineering steht für eine nahezu zeitgleiche Bearbeitung, zum Beispiel während der Produktentwicklung und Produktionsplanung, um wechselseitige Einflüsse rechtzeitig zu erkennen [SAKR05c, VDI96]. Die Zielsetzung dieser Arbeitsweise besteht in der Verkürzung der Time-To-Market, der Reduzierung der Entwicklungs- und Herstellkosten sowie der Erhöhung der Produktqualität [ES05, PBF07, And08].

### 2.1.3. Property-Driven Development and Design

Die Konstruktionsmethodik nach VDI 2221 beschreibt die notwendigen Schritte, um effektiv zu einer Lösung eines gegebenen Problems zu gelangen. Darüber hinaus wird der Konstruktionsprozess durch Regeln des „Design for X“ (DfX) unterstützt. DfX ist eine Ansamm-

lung von Methoden, welche erstmals in den späten 1960-er Jahren entstanden sind und bis heute permanent weiterentwickelt wurden. Heutzutage umfasst DfX vielfältige Regeln für „x-gerechtes“ Konstruieren, wobei „x“ stellvertretend für die unterschiedlichen Themengebiete (z.B. Montage, Umwelt, Kosten, Qualität, Festigkeit, etc.) steht [SA-KR05a, Web07, VWBZ09, AKPFN].

Im Laufe der Zeit hat sich das Selbstverständnis des Design for X jedoch stark gewandelt. Dieser Wandel bezieht sich dabei weniger auf die adressierten Themen, als vielmehr auf die stärkere Integration dieser losgelösten Regeln in den Entwicklungsprozess, z.B. durch die Integration in die vorhandenen IT-Systeme [BDK02, Ehr07, AKPFN]. Um das Produkt und den eigentlichen Konstruktions- bzw. Produktentstehungsprozess besser beschreiben zu können, wurde von Weber der Ansatz des Property-Driven Development (PDD) entwickelt [WW00, WW01].

Dieser Ansatz basiert auf dem Modell des Characteristic-Property Modeling (CPM). Demnach kann ein Produkt durch Merkmale (engl. characteristics C) und Eigenschaften (engl. properties P) beschrieben werden. Merkmale können vom Konstrukteur frei definiert bzw. direkt verändert werden und beschreiben beispielsweise die Gestalt oder den Werkstoff des Produkts. Eigenschaften hingegen ergeben sich aus den Merkmalen und können nur indirekt vom Konstrukteur festgelegt werden, beispielsweise Gewicht, Sicherheit und Zuverlässigkeit, aber auch Eigenschaften wie Herstellbarkeit oder Wartbarkeit. Wie in Abbildung 2.5 zu erkennen, sind Merkmale und Eigenschaften nicht unabhängig voneinander, sondern über Beziehungen (engl. relations R) miteinander verbunden. Darüber hinaus existieren auch zwischen den Merkmalen Abhängigkeiten (engl. dependencies D). Die Auswertung der Beziehun-

gen dient, analog zur klassischen Konstruktionsmethodik, entweder zur Analyse (R) oder zur Synthese ( $R^{-1}$ ) des Produktes während der Produktentwicklung. Das Modell berücksichtigt auch äußere Einflussfaktoren (engl. external conditions EC). Diese ergeben sich immer dort, wo ein Produkt mit seiner Umwelt interagiert. Gleichzeitig lässt sich über External Conditions der Kontext beschreiben, in dem eine Analyse bzw. Synthese der Merkmale und Eigenschaften durchgeführt wird.

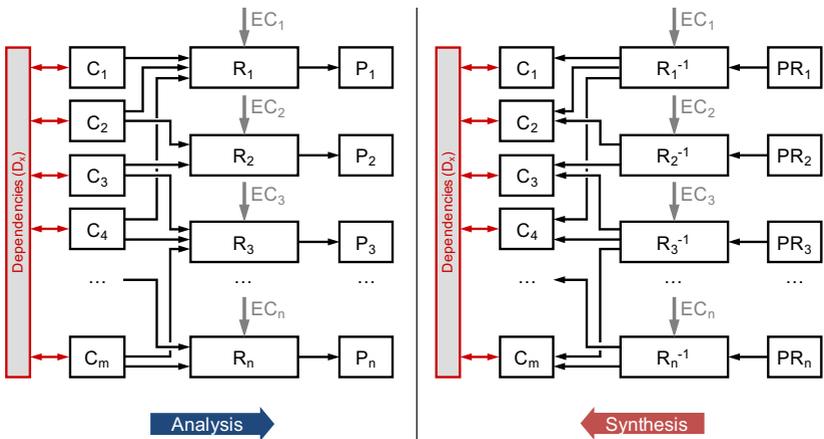


Abbildung 2.5.: CPM-Basismodell zur Beschreibung der Analyse und Synthese während der Produktentwicklung [WW00]

Wird beispielsweise eine Bauteilverbindung auf ihre Montagegerechtigkeit überprüft, muss zunächst geklärt werden, in welchem Kontext (z.B. für welche Lebensphase) diese Analyse durchgeführt werden soll. Ein Montageschritt in einer Serienproduktion setzt dabei ganz andere Montagereihenfolgen, -werkzeuge und -zeiten voraus, als dies in einer Werk-

statt, beispielsweise bei einer Reparatur der Fall ist [RWPM09]. Der Konstruktionsprozess wird durch ein iteratives Vorgehen mit Synthese- und Analyseschritten vollzogen. Wie in Abbildung 2.6 zu erkennen, werden bei der Synthese die geforderten Eigenschaften in Merkmale überführt. Anschließend erfolgt eine Analyse der festgelegten Ist-Merkmale, um festzustellen ob und in welchem Maß die geforderten Soll-Eigenschaften (PR) erfüllt werden. Durch den Vergleich der Ist- mit den Soll-Eigenschaften lässt sich die Differenz ( $\Delta P$ ) ermitteln, welche im weiteren Verlauf der Produktentwicklung zu beheben ist. Erst wenn alle geforderten Merkmale in ausreichender Güte erfüllt sind, hat das Produkt einen Reifegrad<sup>2</sup> erreicht, an dem der Konstruktionsprozess beendet werden kann. Prinzipiell können diese Iterationen beliebig oft durchlaufen werden. Es gibt keine festgelegte Anzahl von Intervallen.

Diese können von Produkt zu Produkt unterschiedlich sein und müssen nicht zwingend zu einem positiven Ergebnis führen. Dies kann insbesondere dann der Fall sein, wenn aufgrund sich widersprechender oder zumindest beeinflussender Anforderungen Zielkonflikte auftreten, z.B. Gewichtsminimierung bei gleichzeitiger Erhöhung der Festigkeit.

### 2.1.4. Design of X vs. Design for X

Simultane Arbeitsweisen haben zum Ziel, Anforderungen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen zeitgleich während der Entwicklung des Produktes zu bearbeiten. Hierfür liefert das Modell des PDD eine trans-

---

<sup>2</sup>Der Produktreifegrad liefert eine Aussage über den aktuellen Entwicklungsstand eines Produktes, hinsichtlich der gegebenen Anforderungen. Dieser kann entweder als verwendungsbezogene Güte [Mül07] oder auch als die Summe der erfüllten Merkmale bzw. Eigenschaften [Web07] verstanden werden.

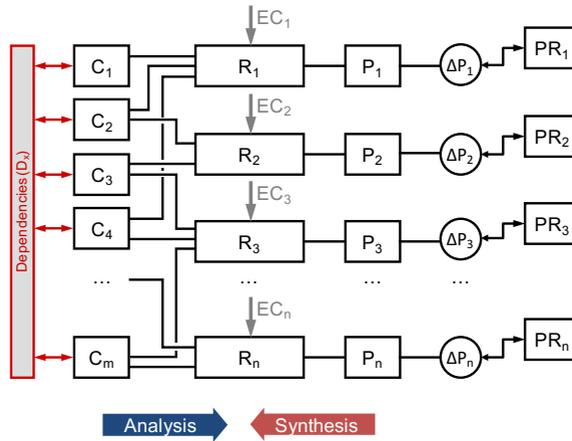


Abbildung 2.6.: Kontinuierliche Reifegradsteigerung durch iterative Analyse- und Syntheseschritten [WW00]

parente Darstellungsform. Basis für die Berücksichtigung zusätzlicher Randbedingungen (z.B. eines Produktionssystems) in diesem Modell bilden die External Conditions (vgl. Abschnitt 2.1.3 auf Seite 23). Diese geben Auskunft über den Kontext, in dem die jeweiligen Eigenschaften beurteilt werden und bilden somit einen Satz relevanter Eigenschaften eines weiteren Systems (x-System), beschreiben also dessen Verhalten [RWPM09].

Ein x-System kann als ein eigenes Produkt mit Merkmalen und Eigenschaften aufgefasst werden, welches ebenfalls durch Analyse und Synthese weiterentwickelt wird. Damit kann das klassische Verständnis von „Design **for** X“ um den Aspekt des „Design **of** X“ erweitert werden. Abbildung 2.7 stellt die prinzipiell möglichen Ausprägungen dar, wie sie in heutigen Entwicklungsprozessen vorzufinden sind.

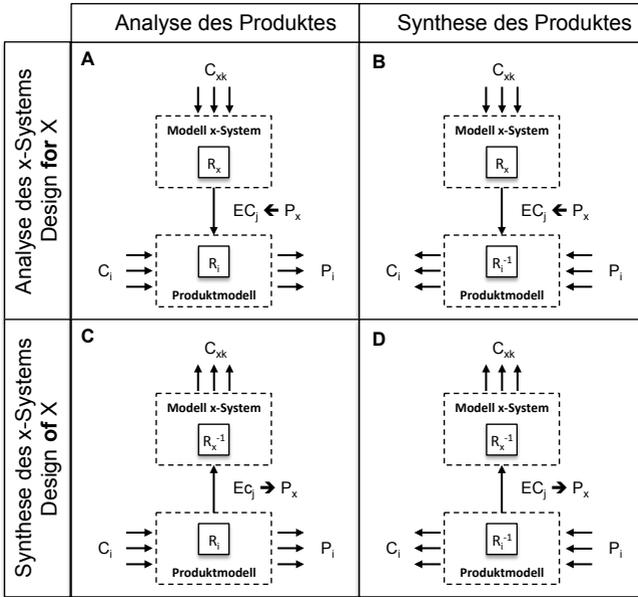


Abbildung 2.7.: Ausprägungen des „Design for X“ und des „Design of X“ [Web07]

## Design for X

Ist das x-System bekannt, können dessen Eigenschaften bei der Analyse und Synthese des Produktes berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 2.7, Fall A und Fall B). Fall A zeigt beispielsweise die Absicherung eines Produktes im Zusammenspiel mit einer Produktionsanlage. Fall B verdeutlicht den Einfluss des x-Systems auf die Gestaltung des Produktes während der Synthese. Fall B kann auch als „x-System-gerechte“ Produktgestaltung bezeichnet werden. Klassische DfX-Ansätze gehen davon aus, dass während der Analyse und Synthese die Merkmale

des x-Systems bekannt sind. Bei Ansätzen wie „Design for Manufacturing“ (DFM) oder „Design for Manufacturing and Assembly“ (DFMA) [BDK02] wird die gemeinsame Bewertung und Optimierung des Produktes und des Produktionssystems vergleichsweise spät im Entwicklungsprozess durchgeführt. Hier stehen bereits detaillierte Kenntnisse der späteren, realen Sachverhalte des Produktionssystems zur Verfügung.

### **Design of X**

Auf der anderen Seite hat das Produkt und dessen Eigenschaften auch Einfluss auf die Analyse und die Synthese des x-Systems (vgl. Abbildung 2.7, Fall C). So dienen in Fall C die definierten Merkmale des Produktes als Randbedingungen bei der Festlegung der Merkmale des x-Systems (produktgerechte Gestaltung des x-Systems). Eine wirklich simultane Entwicklung von Produkt und Produktionssystem liegt jedoch erst dann vor, wenn die gewünschten Soll-Eigenschaften des Gesamtsystems sowohl zur Entwicklung des Produktes als auch zur Entwicklung des x-Systems beitragen (vgl. Abbildung 2.7, Fall D).

Beispielsweise wird die Planung und Gestaltung der Produktionsanlagen nicht nur durch das Produktdesign beeinflusst, sondern auch die Produktgestaltung wird durch Anforderungen des Produktionssystems beeinflusst [Mül07,RWPM09,LRIL97]. Deshalb zielen viele der bekannten Ansätze zur Verbesserung des Produktes und dessen Entwicklung auf diese Phasen ab. Vor dem Hintergrund permanent sinkender Entwicklungszeiten gehören die parallele Bearbeitung von Entwicklungsaufgaben oder die Vorverlagerung von Entwicklungsaufgaben in die

frühen Phasen (Front Loading<sup>3</sup>) wohl zu den bekanntesten Konzepten [SAKR05a, BW96, SBM<sup>+</sup>05].

### 2.1.5. Absicherung im Produktentstehungsprozess

Gemäß der Beschreibung des Property-Driven Development (vgl. Abschnitt 2.1.3 auf Seite 23) erfolgt die Entwicklung eines Produktes durch einen Wechselspiel von Synthese- und Analyseschritten. Während der Synthese werden Lösungsalternativen für die vorgegebenen Soll-Eigenschaften gesucht, bewertet, ausgewählt und umgesetzt. Bei der Analyse wiederum wird der Erfüllungsgrad der Ist-Eigenschaften des Produktes mit den gewünschten Soll-Eigenschaften verglichen. Die hierbei ermittelten Informationen dienen als Grundlage für die Entscheidung über das weitere Vorgehen, z.B. Fortführung der Entwicklungsaktivität, Beenden der weiteren Entwicklung oder Modifikation der aktuellen Entwicklungstätigkeit [Mül07, VDI93].

Während einer Absicherungsuntersuchung können nicht alle Soll-Eigenschaften gleichzeitig berücksichtigt werden. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten ist eine Fokussierung auf eine bestimmte Fragestellung notwendig, welche nachfolgend als Kontext bezeichnet wird. Ein Kontext bildet sozusagen die Rahmenbedingungen, innerhalb derer eine Analyse ihre Gültigkeit hat. Daher werden während der Produktentstehung Absicherungsuntersuchungen unter unterschiedlichsten Rahmenbedingungen (z.B. Serienproduktion, Service, Recycling) durchgeführt, um zeit- und kostenintensive Nacharbeiten zu vermeiden.

---

<sup>3</sup>Ansatz zur Reduzierung von Design-Änderungen, indem Informationen aus späteren Phasen des Produktlebens frühzeitig in den Entwicklungsprozess einfließen [SBM<sup>+</sup>05]

Dennoch können durch die heutigen Arbeitsweisen nicht beliebig viele „was-wäre-wenn-Szenarien“ durchgespielt werden [VDI93, Chu05]. VDI 2206 [VDI04a] spricht in diesem Zusammenhang auch von einer Eigenschaftsabsicherung eines domänenspezifischen Entwurfs nach der Systemintegration. Daher ergibt sich für diese Arbeit die nachfolgende Definition des Begriffs „Absicherung“.

**Definition.** *Absicherung bezeichnet einen Prozess zur Analyse und Beurteilung eines Systems in einem definierten Kontext, an dessen Ende eine Entscheidung über das weitere Vorgehen getroffen wird.*

Die produktionsbezogene Produktabsicherung geht davon aus, dass die Entwicklung des Produktionssystems nahezu zeitgleich mit der Entwicklung des Produktes stattfindet. Dadurch wird bereits zu einem frühen Zeitpunkt die Möglichkeit geschaffen, nicht nur den Einfluss des Produktes bei der Erstellung der Produktionsanlagen darzustellen, sondern gleichzeitig durch die parallele Entstehung der Produktionsanlagen auch Einfluss auf die Gestaltung des Produktes zu nehmen [LBM07, Mül07, RWPM09, WBK<sup>+</sup>08]. Während manche der geforderten Eigenschaften in allen Lebensphasen eine Rolle spielen und sich auf das gesamte Produkt beziehen (z.B. Kosten), gibt es auch Eigenschaften, die eher lokal positioniert sind und sich von Lebensphase zu Lebensphase ändern, beispielsweise die Werkzeugzugänglichkeit während der Serienproduktion oder während einer Reparatur. Betrachtet man den Lebenslauf eines Produktes, so gibt es neben dem Produktionssystem noch weitere Systeme, die Einfluss auf die Entwicklung des Produktes nehmen und somit während der Entwicklung berücksichtigt werden müssen [BLT01, AKPFN]. Die Integration von virtuellen Arbeitsweisen in den Produktentstehungsprozess, wie die digitale Planung, Fertigungs- und Montagesimulationen, setzen auf eine enge Zu-

sammenarbeit der konstruierenden und der planenden Bereiche [ES09]. Zur Sicherstellung des späteren Verhaltens kann das Produkt entweder real<sup>4</sup> oder als digitales Modell<sup>5</sup> vorliegen. In beiden Fällen spricht man auch von Absicherung [Mül07, VDI93, VDI04a, Mei10, GLK08]. Dabei werden entweder reine Produkteigenschaften oder aber die Gesamtsystemeigenschaften im Kontext eines bestimmten x-Systems überprüft. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit auch von der kontextorientierten Absicherung gesprochen.

### 2.2. Produktstrukturierungsmethoden

Eine Struktur bildet die wirkmäßigen Zusammenhänge zwischen den Elementen eines Systems ab [LW06]. Eine Produktstruktur besteht aus einer Menge von Objekten (z.B. Einzelteile, Baugruppen) und Abhängigkeiten, die strukturelle Aspekte eines Produktes in einem definierten Kontext repräsentieren [SM02]. In der Konstruktion wird eine Produktstruktur beispielsweise unter funktionalen Aspekten aufgebaut, während die Produktion ein Produkt gemäß zusammenbauspezifischer (z.B. Fügefolge) oder logistischer Aspekte abbildet. Zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses enthält eine Produktstruktur zusätzliche Informationen, zum Beispiel über die Historie und mögliche Varianten des Produktes (siehe Abbildung 2.8).

---

<sup>4</sup>Physical Mock-up (PMU)

<sup>5</sup>Digital Mock-up (DMU)

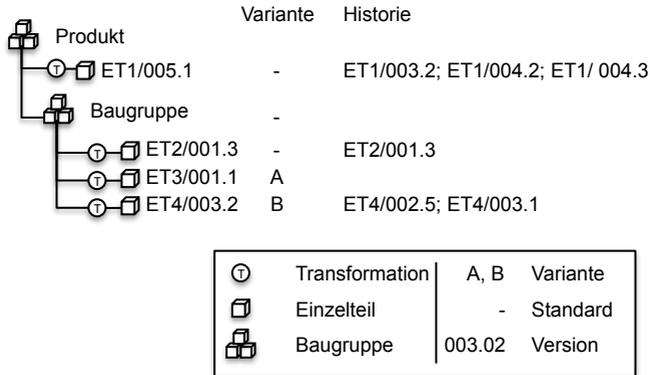


Abbildung 2.8.: Aufbau einer Produktstruktur mit Varianten- und Versionsinformationen

### 2.2.1. Variantenmanagement

Produktstrukturen unterstützen die Dokumentation variantenreicher Produkte. Daher muss die Struktur alternative Einzelteile, Optionen, Codes, Parameter und Regeln enthalten, mit deren Hilfe diese Varianten konfiguriert und angezeigt werden können. Im Bereich der Produktkonstruktion zählen Geometrie- und Lagevarianz zu den vorherrschenden Varianzarten [Vie05]. Geometrievarianz entsteht durch die Änderung geometrischer Merkmale eines Produktes (z.B. Durchmesser, Dicke). Infolgedessen kann es zu Lageänderungen von Bauteilen kommen, die mit dem geänderten Bauteil eine Abhängigkeit besitzen (siehe Abbildung 2.9). In diesem Fall spricht man von Lagevarianz. Darüber hinaus führen auch andere Merkmalsänderungen (z.B. Farbe, Werkstoff) zu weiteren Produktvarianten.

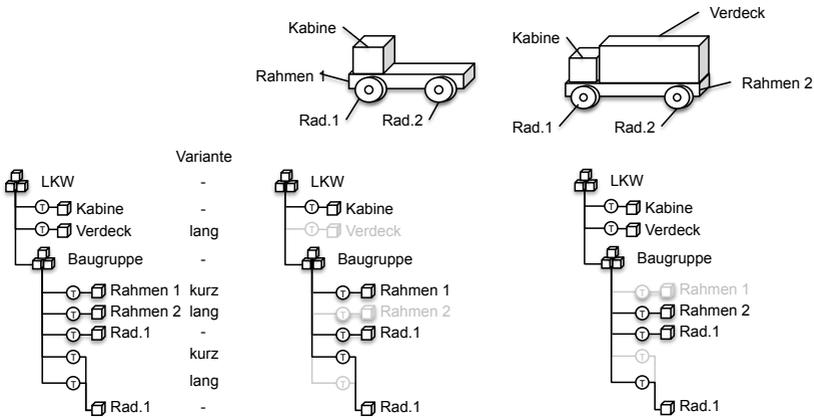


Abbildung 2.9.: Geometrievarianz (Bauteil Rahmen 1 und Rahmen 2) und Lagevarianz (Bauteil Rad.2) in einer Produktstruktur [Vie05]

Die Dokumentation dieser Produktvarianten erfolgt in einer Produktstruktur. Diese wird auch als 150%- oder 200%-Stückliste bezeichnet [Vie05, Mei10, Mü107]. Das bedeutet, die Produktstruktur enthält im nicht-konfigurierten Zustand alle möglichen Varianten. Durch die Anwendung von Regeln zur Konfiguration der Produktstruktur erhält man schließlich eine 100%-Stückliste für eine definierte Produktvariante.

### 2.2.2. Versionsmanagement

Die Darstellung der Historie erfolgt über eine Versionierung der Produktdaten. Die dazu verwendeten Versionsnummern bestehen beispielsweise aus einer Revisions- und einer Sequenznummer. Dabei stellt die Revisionsnummer einen Entwicklungsstrang dar, während die Sequenz-

nummer zur Dokumentation der Zwischenergebnisse innerhalb eines Entwicklungsstrangs verwendet wird. Abhängig von der Konfiguration des Dokumentationssystems werden nur die relevanten Versionen gespeichert.

### 2.2.3. Modularisierung

In der Regel wird bei Fahrzeugprojekten eine modulare Struktur verwendet, welche die Wiederverwendung für nachfolgende Projekte erleichtert. Abbildung 2.10 zeigt am Beispiel des Stücklistensystem DIA-LOG der Daimler AG den Aufbau einer solchen Struktur. Die Stückliste (eng. Bill-of-Material BOM) gibt eine standardisierte Gliederung des Produktes (Baureihe) in Hauptmodule, Module, Submodule usw. vor.

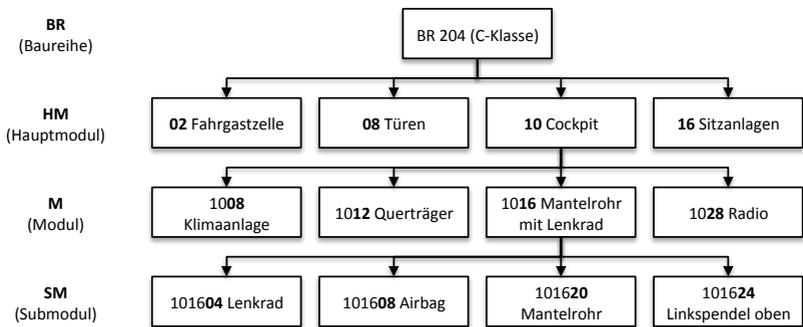


Abbildung 2.10.: Modulare Gliederung einer Baureihe, nach [Göh02]

Jede Position kann in unterschiedlichen Ausprägungen vorkommen, die so genannten Positionsvarianten. Diese können entweder geometrisch unterschiedliche Bauteile oder Bauteile aus unterschiedlichen Materialien sein (z.B. Aluminium, Leder, Kunststoff). Auch diese Elemente wer-

den mit Identifikationsnummern belegt, so dass diese eindeutig in der Struktur identifiziert werden können. Über ein Regelwerk von Codes und eine Auswertelogik können die Positionsvarianten derart gefiltert werden, dass bei einem baubaren Fahrzeug pro Position genau eine Positionsvariante dargestellt wird. Unterhalb der Positionsvarianten befinden sich die Einzelteilsachnummern, welche im CAD-System bearbeitet werden können.

Abhängig vom Fahrzeugprojekt wird von Dokumentationsmitarbeitern entweder eine fahrzeugübergreifende oder eine neu entwickelte Produktstruktur aufgebaut. Handelt es sich beim Fahrzeugprojekt um die Entwicklung eines Derivates, wird auf Basis einer bereits entwickelten Plattform gearbeitet. Sollen neue Technologien, Produktionskonzepte etc. in eine Baureihe eingebracht werden, wird oftmals eine neue Plattform entwickelt [Web09]. Neue Plattformen bieten auf der einen Seite größere Freiheitsgrade, erfordern auf der anderen Seite aber einen längeren Entwicklungsprozess.

### 2.2.4. Sichten

Eine Produktstruktur kann Informationen zu unterschiedlichen Lebensphasen des Produktes enthalten. Dementsprechend existieren auch unterschiedliche Sichten auf diese Daten (vgl. Abbildung 2.11).

Ein Konstrukteur denkt im Wesentlichen in Einzelteilen und Zusammenbauten. Er wird ein Produkt demnach im Sinne von Funktionen und Lösungsbausteinen strukturieren. Eine Produktdokumentation arbeitet hingegen mit Stücklisten und zerlegt ein Produkt nach logistischen oder herstellungstechnischen Aspekten (z.B. Zuliefer-, Ersatzteilumfänge).

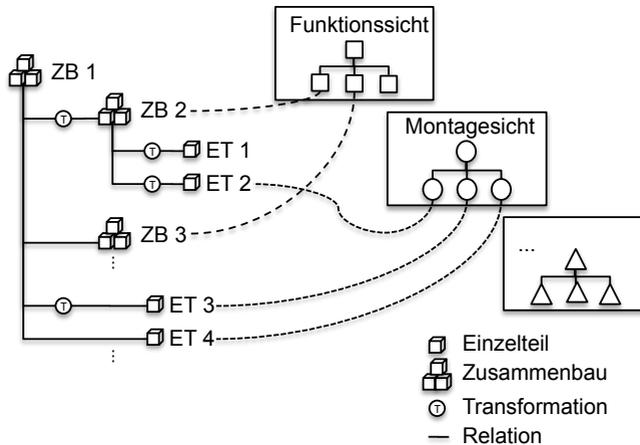


Abbildung 2.11.: Beispiel unterschiedlichen Sichten auf eine Produktstruktur

## 2.3. Informationen im Produktentstehungsprozess

Informationen bilden die Basis für die Entwicklung von Produkten. Seit Ende der 1970-er Jahre die ersten kommerziell nutzbaren, rechnerunterstützten Konstruktionssysteme auf dem Markt erschienen sind, kann ein kontinuierlicher Wandel von der papiergebundenen Zeichnung über rechnerunterstützte 2D- und 3D-Modellierung bis hin zur vollständig parametrisch-assoziativen 3D-Geometrierstellung beobachtet werden [VDI02, VWBZ09]. Auch wenn die dreidimensionale Modellerstellung für die Konstruktion zunächst einen Mehraufwand bedeutet, hat ihre Verbreitung in der Industrie kontinuierlich zugenommen [VDI06]. Aus ökonomischer Sicht rechnet sich dieser Aufwand vor allem deshalb, weil diese Modelle durchgängig und parallel, beispielsweise zur Planung oder Absicherung wiederverwendet werden können [VWBZ09].

### 2.3.1. Informationsarten

Gegen Ende der Produktentwicklung sollten alle Informationen bezogen auf die unterschiedlichen Lebensphasen des Produktes vollständig und widerspruchsfrei in digitaler Form vorliegen [SAKR05b]. Über den Produktentstehungsprozess gesehen, wird dabei mit unterschiedlichen Informationsarten gearbeitet:

- 3D-Geometrie: Beschreibung der wesentlichen geometrischen Abmessungen des Produktes sowie weiterer fertigungsrelevanter Informationen (z.B. Toleranzen)
- Stücklisteninformationen: Beschreibung der Produktstruktur aus verschiedenen Sichtweisen (z.B. EBOM<sup>6</sup>, MBOM<sup>7</sup>)
- Arbeits-, Montage- und Prüfpläne: Beschreibung der notwendigen Arbeitsanweisungen zur Fertigung und Montage des Produktes
- Dispositive Daten: Diese ordnen das Produkt einem konkreten Auftrag zu
- Service- und Reparaturanweisungen: Detaillierte Beschreibungen der Arbeitsschritte in Service- und Reparaturfällen

### 2.3.2. Informationsflüsse

Über das gesamte Produktleben lassen sich mehrere Informationsflüsse unterscheiden. Die Integrierte Produktentwicklung unterscheidet beispielsweise zwischen „Predictive Engineering“ und „Reverse Enginee-

---

<sup>6</sup>Engineering Bill of Material (Konstruktionsstückliste)

<sup>7</sup>Manufacturing Bill of Material (Fertigungsstückliste)

ring“. Wie in Abbildung 2.12 dargestellt, handelt es sich einerseits darum, zu einem frühen Zeitpunkt der Produktentwicklung die Eigenschaften des Produktes bzgl. dessen Lebensphasen festzulegen (Predictive Engineering).

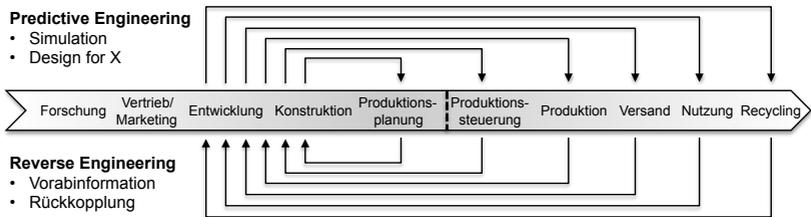


Abbildung 2.12.: Informationsflüsse in der Integrierten Produktentwicklung, nach [SAKR05b]

Andererseits ist dies nur dann möglich, wenn aus den nachgelagerten Lebensphasen ausreichend Informationen und Wissen bereitgestellt wird (Reverse Engineering) [SAKR05b]. Um in der Produktentwicklung auf Anforderungen nachgelagerter Lebensphasen reagieren zu können, müssen diese in einer geeigneten Form vorliegen. Betrachtet man beispielsweise Design for X, so liegen diese Informationen in Form von Richtlinien und Anweisungen vor. Solche Richtlinien führen langfristig zu einer Standardisierung des Produktes (z.B. Plattformstrategie).

Vor dem Hintergrund der simultanen Entwicklung von Produkt und x-System genügt es nicht, diese Informationen einmal zur Verfügung zu stellen. Merkmale des Produktes sowie Merkmale der jeweiligen x-Systemes sind permanenten Änderungen durch innere und äußere Einflüsse unterworfen. Daher ist es notwendig, permanent Informationen zwischen den einzelnen Disziplinen innerhalb der Produktentwicklung (z.B. Konstruktion, Berechnung, Produktionsplanung) auszutauschen.

In den frühen Phasen der Produktentwicklung können nicht alle produktbeschreibenden Merkmale vollständig bekannt sein. Dennoch trägt die frühzeitige Analyse des Zusammenspiels von Produkt und x-System dazu bei, Fehlerquellen zu identifizieren und zu beseitigen [RWPM09]. Auch wenn das Arbeiten mit unsicheren Informationen in den frühen Phasen der Produktentwicklung ein gewisses Risiko birgt, trägt gezieltes Front Loading dazu bei, aufwändige Änderungsschleifen zu vermeiden und die Entwicklungszeit erheblich zu reduzieren [Paa98, GSAM97, FS00, WS05].

### **2.4. Systeme im Produktentstehungsprozess**

In den verschiedenen Phasen, die das Produkt während seines Lebens durchläuft, ändern sich die Arbeitsinhalte und somit auch die Anforderungen an die eingesetzten Computersysteme und -programme. Die sich daraus ergebenden Informationsflüsse in einem Unternehmen und über dessen Unternehmensgrenzen hinaus sind überaus vielschichtig. Daher kommt dem Management dieser Informationsflüsse eine besondere Rolle zu.

Ohne eine entsprechende Unterstützung wäre die Fülle der Informationen, die während der Produktentstehung anfallen, nicht mehr zu beherrschen. Dabei sind im Wesentlichen zwei Systemklassen zu unterscheiden, die sich mit der Erstellung und Verwaltung dieser Informationen befassen: Autoren- und Verwaltungssysteme.

### 2.4.1. Autorensysteme

Die Klasse der Autorensysteme umfasst Anwendungen, die während der Produktentstehung genutzt werden, um Daten zu erzeugen oder bestehende Daten zu validieren. Zur Beschreibung der diversen Systeme dieser Klasse hat sich in den Ingenieurwissenschaften der Begriff der CAx-Systeme (Computer-Aided Everything) etabliert. Darunter fallen beispielsweise CAD (Computer-Aided Design) Systeme zur Modellierung der Produktgeometrie, CAP (Computer-Aided Planning) Systeme zur Planung von Produktionsabläufen und CAE (Computer-Aided Engineering) Systeme für die Berechnung, Validierung und Visualisierung von Produktinformationen [VWBZ09, Mey07, VDI94, BDV<sup>+</sup>03, BVD<sup>+</sup>04].

Mit dem Einsatz von Autorensystemen werden im Wesentlichen die folgende Ziele verfolgt [VDI94]:

- Erhöhung der Flexibilität der Unternehmen, so dass diese schneller auf Veränderungen des Marktes reagieren können.
- Reduzierung der Produktkosten, indem die Entwicklungszeit und die Entwicklungskosten verringert werden.
- Frühzeitige Optimierung der Produkte, Verfahren und Abläufe im Unternehmen.

CAD-Systeme spielen hierbei eine herausragende Rolle, da diese zur Erzeugung der relevanten Produktinformationen genutzt werden. Die dabei erzeugten Informationen dienen als Grundlage für nachfolgenden, Geometrie verarbeitenden Prozesse der Produktentwicklung (z.B. Produktionsplanung, Berechnung oder Simulation).

### 2.4.2. Verwaltungssysteme

Der Einsatz rechnerunterstützter Systeme entlang des Produktentstehungsprozesses hat in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierlich zugenommen. Um die anfallenden Informationen über das Produkt, dessen Entstehungs- und Lebensphasen konsistent zu speichern und zu verwalten, werden datenbankgestützte Verwaltungssysteme eingesetzt. Diese ermöglichen den gezielten Austausch von Informationen innerhalb des Unternehmens (z.B. zwischen weltweit verteilten Entwicklungsstandorten) und über Unternehmensgrenzen hinweg (z.B. mit Lieferanten) [FG08].

Verwaltungssysteme lassen sich in die folgenden Gruppen gliedern:

- EDM-Systeme (Engineering Data Management)
- PDM-Systeme (Product Data Management)
- PLM-Systeme (Product Lifecycle Management)

Als Haupteinsatzgebiet von EDM-Systemen kann die Verwaltung von digitalisierten Papierdokumenten oder nicht produktbezogenen Daten genannt werden. Das bedeutet, die verwalteten Daten haben keinen direkten Bezug zur Produktstruktur (z.B. EBOM oder MBOM) [VDI02, SBM<sup>+</sup>05]. Im Gegensatz dazu befassen sich PDM-Systeme vorrangig mit der Archivierung von Produkt- und Produktstrukturinformationen, also 2D-Zeichnungen und 3D-Geometrie, mit Bezug zu einem bestimmten Entwicklungsprojekt [ES09, VWBZ09]. Teilweise lässt sich die Bedeutung der beiden Begriffe EDM und PDM nicht vollständig voneinander abgrenzen, weshalb diese teilweise synonym verwendet werden [VDI02, Sch97]. Der Begriff des Product Lifecycle Management, wel-

cher sich in den vergangenen Jahren immer stärker durchgesetzt hat, unterscheidet sich von EDM und PDM dahingehend, dass hierunter sowohl eine breitere Abdeckung als auch ein höherer Integrationsgrad über den gesamten Produktlebenslauf verstanden wird [ES09, FG08]. Neben der reinen Datenarchivierung unterstützen Verwaltungssysteme den Entwicklungsprozess dadurch, dass sie standardisierte Arbeitsabläufe durch Workflows steuern. So wird im betrachteten Unternehmen beispielsweise der Freigabeprozess von Bauteilen über einen Workflow realisiert. Dieser stellt sicher, dass die freizugebenden Bauteile eine definierte Qualität aufweisen, Zeichnungen gültigen Normen entsprechen und die Lage der Bauteile im Produkt nicht zu Kollisionen mit anderen Bauteilen führen. Jeder Entscheidung bzw. Freigabe innerhalb des Workflows wird mit einem Zeitstempel und dem verantwortlichen Mitarbeiter dokumentiert. Dadurch kann die Entwicklung eines Produktes nachvollzogen und belegt werden. Die Konstruktionshistorie und die relevanten Entscheidungen, die zur Freigabe des Produktes führen, spielen insbesondere bei Haftungs- und Regressfragen eine wichtige Rolle. Die zentrale Ablage der anfallenden Daten erfolgt in einem Datenspeicher (engl. Vault). Der Zugriff auf diese Daten erfolgt ausschließlich über die Datenbank und die Nutzeroberfläche des PDM-Systems. Über die Nutzeroberfläche können die vorhandenen Produktdaten entsprechend gesucht und gefiltert werden. Eine besondere Stärke von PDM-Systemen ist der Schutz der gespeicherten Daten gegen unberechtigte Zugriffe. Über die enthaltenen Schutzmechanismen lassen sich detaillierte Zugriffsberechtigungen (z.B. lesen, schreiben, suchen) analog der existierenden Organisationsstruktur eines Unternehmens aufbauen. Dadurch kann der Zugriff sowohl über die aktuelle Rolle in einem Projekt (z.B. Support, Konstrukteur, Planer) als auch über eine entsprechende Baureihen- oder Projektzugehörigkeit geregelt werden.

### 2.4.3. Zusammenspiel von Verwaltungs- und Autorensystemen

Der Austausch von Daten zwischen Verwaltungs- und Autorensystemen erfolgt über Schnittstellen. Diese ermöglichen die Bearbeitung der Daten in Autorensystemen und die Archivierung in Verwaltungssystemen (siehe Abbildung 2.13).

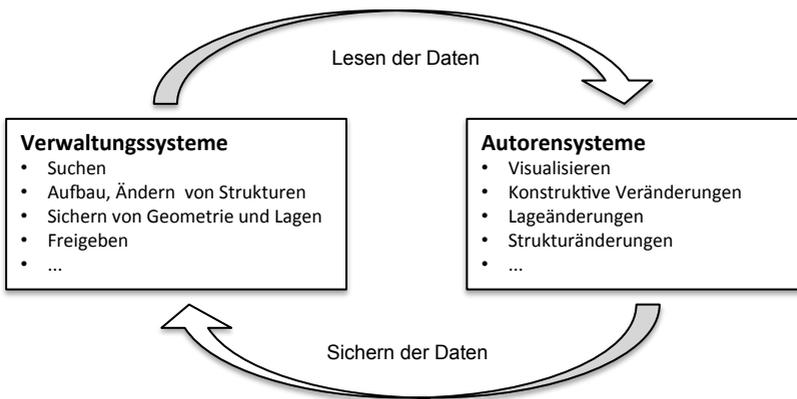


Abbildung 2.13.: Zusammenspiel von Verwaltungs- und Autorensystemen

Die in der Produktentwicklung auftretenden Informationsflüsse sind vielschichtig, wobei mittlerweile fast jedes Erzeugersystem auch ein eigenes Verwaltungssystem (Datenbanksystem) mit sich bringt. Die stark funktionsorientierte Sichtweise bei der Entwicklung dieser Systeme hat in der Vergangenheit zu einer zunehmenden Heterogenität der Systemlandschaft in Unternehmen geführt (vgl. Abbildung 2.14), während methodische Ansätze zur sinnvollen Integration der eingesetzten Systeme vernachlässigt wurden [BVD<sup>+</sup>04].

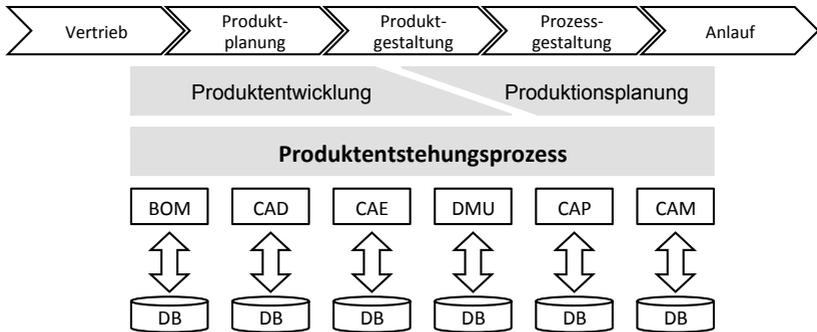


Abbildung 2.14.: Heterogenität der IT-Systeme entlang des Produktentstehungsprozesses, nach [SAKR05b]

Diese Systemvielfalt führt zu Systemgrenzen, die einer verlustfreien Datenübertragung entgegenstehen. In der Praxis lässt sich beobachten, dass sich die organisatorische Trennung von Fachbereichen in Systemgrenzen widerspiegelt und oftmals einer Integration entgegenstehen. Dabei erfolgt die Entwicklung von Produkten längst nicht mehr entlang einer festgelegten Prozesskette. Moderne Entwicklungsprozesse haben die Methoden des Concurrent und Simultaneous Engineering bereits voll integriert, so dass hier ein erhöhter Bedarf an paralleler und integrierter Informationsverarbeitung vorliegt.

## 2.5. Organisation

Das Ziel des Entwicklungsprozesses besteht darin, zu einem definierten Zeitpunkt ein Produkt oder eine Dienstleistung zu erhalten, welches die gestellten Anforderungen erfüllt. Sobald diese Aufgabe von mehreren Personen erledigt werden soll, ist es notwendig die beteiligten Personen

mit ihren Kompetenzen und ihrer Verantwortung sowie die Kommunikation zwischen diesen zu organisieren. Die Organisation und Steuerung eines solchen Prozesses wird dabei im Wesentlichen durch die Aufbau- und die Ablauforganisation bestimmt.

### 2.5.1. Aufbauorganisation

**Definition.** *Die Aufbauorganisation gliedert ein Unternehmen in Teilsysteme und regelt die Arbeitsprozesse zwischen diesen [Sch97, Ehr07, SBL10].*

Die Gliederung eines Unternehmens kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten gestaltet werden [Sch98]:

- nach Funktionsbereichen
- nach Produktbereichen
- nach Phasen der Produktentstehung
- nach Marktbereichen oder Regionen
- nach Projekten

### 2.5.2. Ablauforganisation

**Definition.** *Die Ablauforganisation regelt die Arbeitsprozesse während der Produkterstellung, indem sie eine inhaltliche, räumliche, zeitliche und personelle Gliederung der Bereiche der Aufbauorganisation vornimmt [Sch97, Ehr07, SBL10, Wes06].*

Der Ablauf eines Entwicklungsprozesses erfolgt dabei über standardisierte Ablaufpläne, bestehend aus Phasen und Meilensteinen. Diese dienen als Hilfsmittel zur Strukturierung sonst unklarer Abläufe und helfen dabei, die bestehende Komplexität der Entwicklungsaufgabe zu bewältigen, ohne dabei inhaltliche Hilfestellungen zu geben [Ehr07, Sch97]. Durch eine geplante Abfolge von Bearbeitungs- und Prüfphasen lässt sich so der Reifegrad des Produktes sukzessive erhöhen und kontrollieren. Die Zeitpunkte, zu denen die Überprüfungen stattfinden, werden als Meilensteine oder Quality Gates bezeichnet [ES05].

## **2.6. Kontext**

Betrachtet man die Lebensphasen von Bauteilverbindungen, so stellt jede Phase eigene Anforderungen an diese. Die einzelnen Lebensphasen bilden somit den Kontext, in dem beispielsweise Absicherungsuntersuchungen während der Produktentstehung durchgeführt werden.

### **2.6.1. Kontextorientierte Absicherung**

Die Gestaltung eines Produktes während der Produktentstehung erfolgt unter verschiedenen Gesichtspunkten. Neben den definierten Soll-Eigenschaften des Produktes müssen auch zusätzliche Anforderungen berücksichtigt werden, die sich aus den einzelnen Lebensphasen ergeben. Abbildung 2.15 zeigt exemplarisch Anforderungen, die während der Produktentstehung berücksichtigt werden.

Während der digitalen Absicherung dienen Anforderungen als Fragestellungen, nach denen das Produkt analysiert wird. Während der Ab-

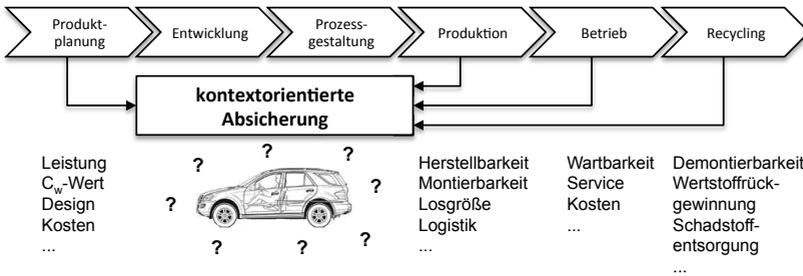


Abbildung 2.15.: Kontextorientierte Absicherung des Produktes auf Basis von Anforderungen aus unterschiedlichen Lebensphasen während der Produktentstehung

sicherung identifizierte Probleme können jedoch nicht isoliert betrachtet werden, da es aufgrund von widersprüchlichen Anforderungen immer wieder zu Zielkonflikten bei der Lösungsfindung kommt. Vielmehr ist eine umfassende Betrachtung des Produktes und der relevanten x-Systeme notwendig, da es immer zu einer wechselseitigen Beeinflussung kommen kann (vgl. Abschnitt 2.1.4 auf Seite 26). Die Anzahl dieser wechselseitigen Einflüsse sind in den frühen Phasen der Produktentwicklung noch vergleichsweise gering. Hier werden Verbindungen zunächst nach gegebenen Lastfällen, Fahrprogrammen oder Temperaturgrenzwerten ausgelegt und dimensioniert. Hinzu kommt die Fragestellung, ob eine Verbindung später lösbar oder nicht-lösbar sein soll. Je weiter die Entwicklung des Produktes voranschreitet, um so mehr Einflussfaktoren (Kontexte) müssen berücksichtigt werden.

Bereits beim Aufbau der ersten Prototypen wird digital geplant und simuliert. Dazu fließen bereits entsprechende Kontextinformationen bezüglich verwendeter Werkzeuge, Handhabungsvorrichtungen und Aufbaureihenfolgen ein. In vielen dieser Fälle entspricht die Montagereihen-

folge bereits der späteren Serienproduktion. Aufgrund geringerer Fertigungsflächen und Stückzahlen unterscheidet sich der Prototypenbau allerdings erheblich in der Fertigungstiefe pro Station und den eingesetzten Werkzeugen. Beispielsweise werden viele Fügeschritte mit Hilfe manueller Werkzeuge durchgeführt, während in der Produktion ein höherer Automatisierungsgrad vorherrscht. Zusätzlich führt die höhere Fertigungstiefe in Arbeitsstation dazu, dass Haltevorrichtungen nicht nur für ein paar wenige, sondern für viele unterschiedliche Fügeoperationen ausgelegt werden. Alle diese Parameter führen dazu, dass beide Lebensphasen unterschiedliche Kontextinformationen erfordern, die bei einer digitalen Absicherung berücksichtigt werden müssen.

Diese ergeben sich entweder aus dem Prototypenbau, der Serienproduktion oder den späteren Service- und Reparaturfällen bzw. dem Recycling. In jedem Anwendungsfall wird eine reibungslose Montage bzw. Demontage der vorhandenen Verbindungen gefordert. Die Hilfsmittel und Randbedingungen (z.B. Aufbauzustand des Produktes), die in den entsprechenden Situationen vorzufinden sind, können dabei sehr unterschiedlich ausgeprägt sein.

Handelt es sich um eine lösbare Verbindung, werden sowohl Montage- als auch Demontagefälle geprüft. Hier arbeiten insbesondere die After-Sales-Bereiche<sup>8</sup> zunehmend mit digitalen Modellen, um Wartungs- und Reparaturanleitungen zu erstellen. Dazu werden während der Produktentwicklung Untersuchungen bezüglich Wartung und Reparatur durchgeführt, um diese Prozesse so kostengünstig wie möglich zu gestalten. Die Demontage und Montage des Produktes muss hierbei völlig neu geplant werden. Montagereihenfolgen und Werkzeuge der Serienproduktion lassen sich nicht auf Wartungs- und Reparaturfälle übertragen.

---

<sup>8</sup>Geschäftsbereich, der sich mit der Betreuung des Kunden und des Produktes nach Produktion und Verkauf des Produktes auseinandersetzt

Gerade der verstärkte Einsatz nicht-automatisierter, kombinierbarer Standardwerkzeuge einerseits und der Einsatz von Sonderwerkzeugen für spezielle Einsatzbedingungen stellen einen völlig anderen Kontext als in den anderen Lebensphasen dar und erfordern eine intensive Planung und Validierung.

Als letzte zu betrachtende Lebensphase gewinnt auch das Recycling eine immer bedeutendere Rolle. Neben der gesetzlich vorgeschriebene Entsorgung schädlicher Giftstoffe (z.B. Öl, Bremsflüssigkeit, Batterie, etc.) enthalten Produkte auch verwertbare Rohstoffe (z.B. Edelmetalle) oder weiterhin funktionsfähige Komponenten, die recycelt werden. Um diese dem Produkt zu entnehmen und erneut in den Verwertungskreislauf zurückführen zu können, ist eine entsprechende Demontage des Produktes notwendig. Um Kosten zu sparen, ist die Demontage so effektiv wie möglich durchzuführen, weshalb auch hier entsprechende Demontageschritte und -werkzeuge zu validieren sind.

### **2.7. Fazit**

Die Absicherung von Produkten in der digitalen Phase der Produktentwicklung kann die Kosten für die Fehlererkennung und -beseitigung erheblich reduzieren. Daher finden heutzutage viele Untersuchungen nicht mehr am realen Produkt bzw. an den realen Produktionsanlagen statt, sondern werden anhand von rechnerunterstützten Simulationsmodellen durchgeführt.

Die konsequente Verlagerung von Absicherungsuntersuchungen in die digitale Lebensphase des Produktes stellt erhöhte Anforderungen an die Qualität der zur Verfügung gestellten Produktdaten. Im Sinne eines

Front-Loading müssen mehr Informationen als früher in den digitalen Produktmodellen enthalten sein, um diese schneller in Simulationen einzusetzen.

Ziel der digitalen Absicherung ist, möglichst alle zukünftigen Systemzustände bereits während der Produktentwicklung zu berücksichtigen, um frühzeitig Änderungen beispielsweise am Produkt oder an Produktionsanlagen vorzunehmen. Diese Systemzustände ergeben sich aus den unterschiedlichen Phasen, die ein Produkt während seines Lebens durchläuft und bilden den Kontext, in dem Absicherungen durchgeführt werden.

Während einer Absicherungsuntersuchung befinden sich sowohl das zu entwickelnde Produkt als auch die diversen x-Systeme in unterschiedlichen Zuständen und können im weiteren Entwicklungsprozess entweder noch verändert werden oder sind bereits vollständig entwickelt, so dass keine Veränderungen mehr zulässig sind. Dieser Umstand muss bei der digitalen Absicherung berücksichtigt werden, da hierdurch die Freiheitsgrade während der Simulation eingeschränkt werden. Dies kann entweder dazu führen, dass das Produkt gemäß den Restriktionen, welche sich durch das x-System ergeben, geändert wird oder aber das x-System entsprechend auf das Produkt hin optimiert wird.



## **3. Grundlagen Verbindungen**

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Absicherung von festen Verbindungen in der Automobilindustrie. Im Fokus steht insbesondere die Absicherung der unterschiedlichen Lebensphasen des Produktes während der Produktentstehung. Jede dieser Phasen kann dabei unterschiedliche Anforderungen an das Produkt und dessen feste Verbindungen haben. Die konsequente Absicherung dieser Anforderungen bedarf einer ausreichenden Güte der zur Verfügung gestellten Produktdaten. Daher wird dieses Kapitel zunächst „Verbindungen“ definieren und anschließend Möglichkeiten der Dokumentation und Absicherung in den IT-Systemen der Produktentwicklung vorstellen.

### **3.1. Verbindungen**

Verbindungen bilden einen Zusammenschluss von zwei oder mehreren festen Körpern, der auch unter Betriebsbedingungen bestehen bleibt. Je nach Anforderung und Ausführung können diese als bewegliche oder feste Verbindungen realisiert werden. Damit kann prinzipiell jede Nahtstelle in einer Produktkonstruktion als Verbindung aufgefasst werden [VDI04c]. Feste Verbindungen sind dadurch gekennzeichnet, dass zwischen den Verbindungspartnern im verbundenen Zustand in keinem

### 3. Grundlagen Verbindungen

---

der sechs Freiheitssinne<sup>1</sup> eine Relativbewegung zugelassen wird. Dieser Verbund wird entweder durch Stoff-, Form- oder Kraftschluss realisiert [Rot96]. Abhängig von der Art der Verbindung werden feste Verbindungen mit oder ohne Zusatzteil/-stoff bzw. als lösbare oder nicht lösbare Verbindung realisiert.

Abhängig von der Art der Verbindung können die Bauteile entweder zerstörungsfrei oder durch die Beschädigung eines oder mehrerer Bauteile bzw. Verbindungspartner voneinander getrennt werden [Rot96, DIN03b]. Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, werden feste Verbindungen nachfolgend in (zerstörungsfrei) lösbare und nicht-lösbare Verbindungen unterteilt, wobei die Verbindung wiederum entweder mit oder ohne zusätzliche Bauteile oder Stoffe (Verbindungshilfsmittel) realisiert werden kann.

	lösbar	nicht lösbar
mit Zusatzteil/-stoff	z.B. Schrauben-, Schnappverbindung	z.B. Niet-, Klebeverbindungen
ohne Zusatzteil/-stoff	z.B. eingegossene Schnappverbindung	z.B. Schweißverbindung

Abbildung 3.1.: Einteilung fester Verbindungen, nach [Rot96, AOK80, DK11]

**Definition.** *Feste Verbindungen bilden einen Zusammenschluss von zwei oder mehreren festen Körpern, welcher in einem Fügeprozess mit oder ohne zusätzliche Verbindungshilfsmittel (z.B. Verbindungselemente oder Verbindungsstoffe) erzeugt wird und keine Relativbewegungen zwischen den Verbindungspartnern zulässt [Rot96].*

---

<sup>1</sup>Roth [Rot96] geht in seiner Beschreibung von 12 Freiheitssinnen aus, da er für jeden Freiheitsgrad sowohl positiver als auch negative Bewegungsrichtungen/-rotationen annimmt

Abbildung 3.2 zeigt am Beispiel einer Schraubverbindung die Elemente einer festen Verbindung.

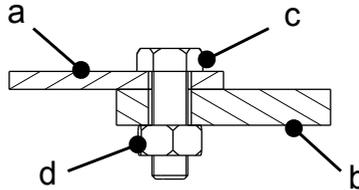


Abbildung 3.2.: Elemente einer festen Verbindung: a, b - Verbindungspartner; c, d - Verbindungshilfsmittel

Gemäß DIN 8580 [DIN03a] werden die Fertigungsverfahren in mehrere Kategorien unterteilt. Zur Herstellung mechanischer Verbindungen in einem Produkt spielt insbesondere das Fertigungsverfahren „Fügen“ eine große Rolle. Abbildung 3.3 zeigt die Aufteilung der möglichen Fügeverfahren nach DIN 8593 [DIN03b].

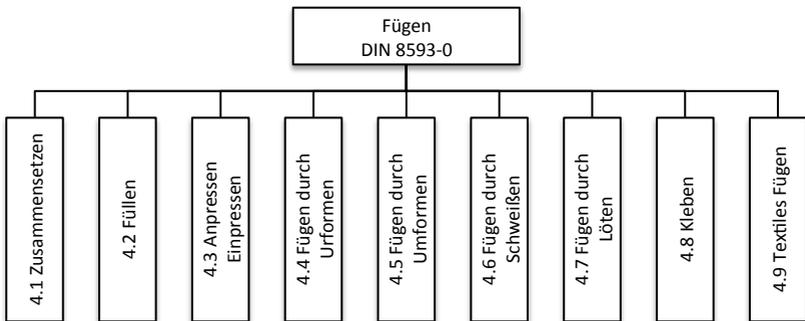


Abbildung 3.3.: Einteilung der Fertigungsverfahren „Fügen“ [DIN03b]

### 3. Grundlagen Verbindungen

---

Im Rahmen dieser Arbeit werden Fügeverfahren und Verbindungsarten betrachtet, die in der Automobilindustrie am häufigsten Anwendung finden. In Tabelle 3.1 sind zwei typische Fahrzeugmodelle mit den Verbindungsarten aufgeführt, die den größten Anteil der vorkommenden Verbindungen ausmachen. Darin ist deutlich zu erkennen, dass die Fügeverfahren „Fügen durch An- und Einpressen“, „Fügen durch Schweißen“, „Fügen durch Löten“ und „Kleben“ die am häufigsten verwendeten Fügeverfahren darstellen.

Tabelle 3.1.: Übersicht der häufigsten Verbindungsarten in einem A3 Sportback [Cra05] und einer C-Klasse Limousine (interne Analyse)

<b>A3 Sportsback (8P)</b>	<b>C-Klasse (BR 204)</b>
4565 Schweißpunkte	5230 Schweißpunkte
284 Schweißmuttern/-bolzen	405 Schweißmuttern/-bolzen
58.000 mm Kleben	790 Schrauben
5.652 mm Löten	180 Laserschweißpunkte

Betrachtet man den Produktentstehungsprozess im untersuchten Unternehmen, so lässt sich erkennen, dass für lösbare und nicht-lösbare feste Verbindungsarten teilweise unterschiedliche Prozesse in der Produktentwicklung gelebt werden. Hier wird zwischen nicht-lösbaren Rohbauverbindungen (z.B. Schweißen und Kleben im Karosserierohbau) und lösbaren Montageverbindungen (z.B. Schraub-, Schnappverbindungen in der Endmontage) unterschieden [RB08].

Daneben werden Verbindungen bzw. Verbindungselemente danach kategorisiert, ob sie als eigenständiges Bauteil im PDM-System verwaltet werden oder nicht. Verbindungselemente wie Schrauben, Muttern und Niete werden beispielsweise als eigenständige Elemente in den CAD-

Modellen und dem PDM-System gepflegt. Im Gegensatz dazu werden Klebe- und Schweißverbindungen in einem Metadatenmodell (Verbindungsmodell) dokumentiert und verwaltet. Die Visualisierung bzw. Repräsentation der Verbindungselemente erfolgt in diesen Modellen über eine Ersatzgeometrie, zum Beispiel durch einen Punkt und einen Richtungsvektor mit den zugehörigen Prozessinformationen (siehe auch Abschnitt 3.3.2 auf Seite 72).

Neben der Handhabung dieser Verbindungen bzw. Verbindungselemente in PDM-Systemen lassen sich auch unterschiedliche Methoden identifizieren, wie diese im Produktentstehungsprozess gehandhabt werden. Diese unterscheiden sich meist auch hinsichtlich des Einsatzgebietes der Verbindung. Die nachfolgenden Abschnitte gehen auf diese Unterschiede ein.

#### 3.1.1. Lösbare Verbindungen

**Definition.** *Unter lösbaren Verbindungen werden Bauteilverbindungen zwischen zwei oder mehreren Verbindungspartnern verstanden, die ohne Beschädigung der Verbindungspartner oder Verbindungshilfsmittel wieder gelöst werden können [Rot96].*

Diese Art von Verbindung wird vor allem dort eingesetzt, wo die Aufteilung des Produktes in mehrere Einzelteile notwendig ist, beispielsweise zur Realisierung einer sinnvollen und wirtschaftlichen Montage. Ferner ergibt sich die Notwendigkeit einer zerstörungsfreien Demontage auch an Bauteilen oder Baugruppen, welche aus Service- oder Reparaturgründen zugänglich bzw. in austauschbare Einheiten zerlegbar sein müssen [Rot96, Bau91].

### 3. Grundlagen Verbindungen

---

Zu dieser Gruppe zählen zuallererst Schraubverbindungen. Schraubverbindungen weisen ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten auf und zählen zu den am häufigsten eingesetzten Maschinenelementen [MMW<sup>+</sup>01]. Sie lassen sich sowohl für hohe Beanspruchungen als auch für einfache Anwendungsfälle, wie etwa Abdeckungen etc. einsetzen<sup>2</sup>. Da es sich nicht um eine stoffschlüssige Verbindung handelt, können auch unterschiedliche Materialien miteinander verbunden werden. Gerade im Karosserierohbau werden an vielen Stellen Schweißschrauben/-bolzen bzw. -muttern verwendet, an denen dann weitere Bauteile befestigt werden.

Darüber hinaus gibt es auch eine Vielzahl von Schnappverbindungen, die entweder in integrierter oder differenzierter Bauweise ausgeführt sein können. Dabei handelt es sich um kraftformschlüssige Verbindungen [Erh08]. Um den Montageaufwand zu reduzieren, wird angestrebt Schnappelemente als integrierte Bestandteile der Verbindungspartner zu realisieren (siehe Abbildung 3.4).

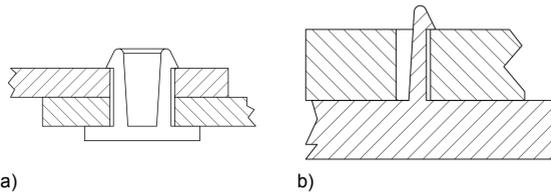


Abbildung 3.4.: Beispiel einer Schnappverbindung: a) als differenzierte Lösung, b) als integrierte Lösung

---

<sup>2</sup>Roloff/Matek [MMW<sup>+</sup>01] unterscheiden Befestigungsschrauben, Bewegungsschrauben und Dichtungsschrauben. Im Rahmen dieser Arbeit spielen Bewegungsschrauben allerdings keine Rolle, da es sich hierbei nicht um eine feste Verbindung im vorher definierten Sinn handelt.

Um die Sicherheit technischer Produkte gewährleisten zu können, erfolgt für jede Verbindung eine Berechnung und Auslegung. Dabei werden nicht nur die Verbindungspartner und Verbindungshilfsmittel berücksichtigt, sondern auch die Produktionssysteme, mit denen diese Verbindungen gefügt werden. Dessen Prozesssicherheit ist maßgeblich für die Dauerfestigkeit und Sicherheit der Verbindungsstelle verantwortlich. VDI 2862 [VDI99b] unterscheidet beim Einsatz von Schraubensystemen in der Produktion drei Sicherheitsklassifizierungen für Verbindungen, die den Aufwand bei der Entwicklung und Absicherung mit bestimmen:

- Kategorie A: Mittelbare oder unmittelbare Gefahr für Leib und Leben
- Kategorie B: Liegenbleiben
- Kategorie C: Verärgerung des Kunden

Demzufolge wird beispielsweise während der Produktentstehung die Verschraubung einer Abdeckung weniger intensiv behandelt als die Verschraubung eines Airbags. Bei der Erstellung der CAD-Modelle und der Archivierung der Entwicklungsdaten werden lösbare Verbindungen jedoch eher nachrangig behandelt [Vie05, Res06]. Eine Ursache hierfür liegt vor allem im hohen Aufwand begründet, welcher für die Dokumentation und Positionierung der Kleinteile im CAD-Modell des Produktes verursacht. Insbesondere dann, wenn der Positionierung von Kleinteile im CAD-Modell kein direkter Nutzen in nachfolgenden Prozessschritten gegenübersteht. Durch die zunehmende Bedeutung digitaler Absicherungen im Produktentstehungsprozess und die permanente Weiterentwicklung von Methoden zur produktionsorientierten Produktabsicherung, werden jedoch immer höhere Anforderungen an die Qualität und

Vollständigkeit der verwendeten CAD-Modelle gestellt. Dabei werden Montageuntersuchungen für die Produktion, den Service und für das Recycling bereits frühzeitig in der Produktentwicklung durchgeführt [RB08].

#### 3.1.2. Nicht-lösbare Verbindungen

**Definition.** *Unter nicht-lösbaren Verbindungen werden Bauteilverbindungen zwischen zwei oder mehreren Verbindungspartnern verstanden, die sich nur durch die Beschädigung von mindestens einem Verbindungspartner oder Verbindungshilfsmittel wieder lösen lassen [Rot96].*

Nicht-lösbare Verbindungen (z.B. Schweiß- und Klebeverbindungen) sind in der Automobilindustrie sehr weit verbreitet und bilden die Grundlage des Karosserierohbaus [Fra03]. Aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen und Kosten in der Produktion wurden in der Vergangenheit viele Methoden und Softwarewerkzeuge entwickelt, um diese Verbindungen möglichst effizient zu modellieren, zu planen und digital abzusichern.

Die Zeit- und Kostenvorteile ergeben sich dabei zu einem großen Teil aus der durchgängigen Nutzung der Verbindungsinformationen von der Konstruktion über die Planung bis hin zur Inbetriebnahme der Produktionsanlagen. Durch die kombinierte Simulation von Produkt, Haltevorrichtung und Fügwerkzeug (z.B. Schweißzangen oder Klebepistolen) lassen sich Probleme frühzeitig erkennen und noch in der digitalen Phase beheben. Die Fähigkeiten der digitalen Modelle gehen sogar so weit, dass die programmierten Bewegungsabläufe von Robotern, die für die Zuführung und das Fügen der Einzelteile zuständig

sind, bereits mithilfe von simulierten CAD-Modellen überprüft werden können. Durch diese virtuelle Inbetriebnahme können Fehler frühzeitig erkannt und somit Kosten bei der realen Inbetriebnahme eingespart werden [Kie07].

## 3.2. Dokumentation von Verbindungen

Zur Sicherstellung der funktionalen und montagetechnischen Gegebenheiten werden Verbindungen während ihrer Entwicklung auf Anforderungen aus den unterschiedlichen Lebensphasen analysiert. Eine Verlagerung von Analysen in die digitale Welt erfordert eine entsprechend hohe Datenqualität der vorliegenden Produktdaten. Daher befasst sich der nachfolgende Abschnitt mit den Möglichkeiten, wie Verbindungsinformationen in Produktstrukturen dokumentiert werden können. Verbindungsinformationen können dabei sowohl in CAD-Modellen als auch in PDM-Systemen dokumentiert und gepflegt werden. Innerhalb eines CAD-Modells besteht bereits eine einfache Repräsentation von Verbindungen derart, dass alle zur Erstellung der Verbindung notwendigen Verbindungspartner unterhalb eines Zusammenbauknotens verbaut werden. Wie in Abbildung 3.5 zu erkennen, enthält diese logische Zuordnung unterhalb eines Zusammenbauknotens keine direkte Information darüber, um welche Art von Verbindung es sich handelt und wie die einzelnen Bauteile miteinander verknüpft sind. Die Einzelteile werden lediglich unter einem Zusammenbauknoten aufgeführt und mit einer Lageinformation (Transformationsmatrix) versehen. Einen Hinweis bezüglich der logischen Verknüpfung der Bauteile wird zwar durch den Zusammenbau an sich gegeben, das vollständige Verständnis darüber, ob es sich um eine Verbindung handelt, wird jedoch erst durch die Visualisierung des Zusammenbaus ersichtlich.

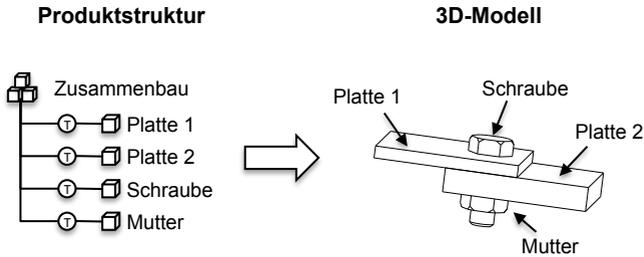


Abbildung 3.5.: Produktstruktur und 3D-Modell einer Schraubverbindung

Zur Dokumentation von Verbindungsinformationen gibt es daher unterschiedliche Ansätze. Jeder dieser Ansätze bietet andere Möglichkeiten Verbindungsinformationen zu dokumentieren und nachfolgenden Prozessschritten zur Verfügung zu stellen. Laut [Vie05] existieren die folgenden vier Möglichkeiten, welche nachfolgend im Kontext dieser Arbeit diskutiert werden:

- Dokumentation auf Ebene des Zusammenbaus
  - Dokumentation auf der Zusammenbauzeichnung
  - Dokumentation am Zusammenbauobjekt
- Dokumentation auf Ebene der Einzelteile
  - Dokumentation an einem der Einzelteile
  - Dokumentation an einem zusätzlichen Einzelteil / Objekt

### 3.2.1. Dokumentation auf Ebene des Zusammenbaus

Auf der Ebene des Zusammenbaus können Verbindungsinformationen entweder in technischen Zeichnungen oder am Zusammenbauobjekt selbst dokumentiert werden. Nachfolgend werden diese beiden Ansätze vorgestellt und am Beispiel einer Schraubverbindung erläutert. Die getroffenen Aussagen gelten dabei auch für andere Verbindungsarten.

#### Dokumentation auf der Zusammenbauzeichnung

Zusammenbauzeichnungen stellten jahrelang das primäre Medium zum Austausch von Informationen zwischen Produktentwicklung und Fertigung dar. Bei dieser Art der Dokumentation wird die technische Zeichnung manuell mit weiteren Informationen angereichert. CAD-Systeme generieren technische Zeichnungen direkt aus dem 3D-Modell. Über die assoziative Verknüpfung der 2D- und 3D-Daten lassen sich Änderungen an den Geometrien in den abgeleiteten Zeichnungen aktualisieren. Änderungen an der 2D-Zeichnung lassen sich jedoch nicht umgekehrt in Änderungen der 3D-Geometrie überführen.

Die technische Zeichnung trägt damit alle relevanten Informationen bzgl. der verbauten Bauteile (siehe Abbildung 3.6) sowie zusätzliche Informationen, etwa für den Fertigungs- oder Montageprozess. So tragen Zusammenbauzeichnungen für Schweißkonstruktionen Informationen über Stromstärke oder die Durchmesser der Schweißpunkte. Im Fall von Schraubverbindungen werden hier Angaben über Drehmomente, Drehmomenttoleranz, Oberflächenrauheit usw. erfasst. Diese Informationen werden entweder über Berechnungen oder Experimente ermittelt und manuell auf der Zeichnung gepflegt.

### 3. Grundlagen Verbindungen

---

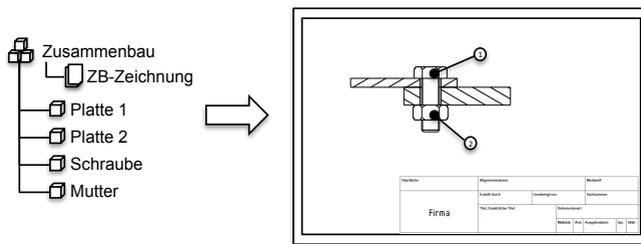


Abbildung 3.6.: Dokumentation von Verbindungsinformationen in einer Zusammenbauzeichnung [Vie05]

Informationen, welche manuell auf einer Zeichnung angebracht werden und nicht über assoziative Verknüpfung mit dem 3D-Modell synchronisiert werden können, sind von einer solchen Aktualisierung ausgenommen. Änderungen an der 3D-Geometrie erfordern daher eine manuelle Kontrolle, ob die Informationen der Zeichnung nach wie vor aktuell sind. Dadurch entsteht ein erhöhter Pflegeaufwand für diese Informationen während der Produktentstehung. Neben reinen Verbindungsinformationen erlauben Zusammenbauzeichnungen darüber hinaus die Erfassung weiterer Informationen und bieten damit eine große Flexibilität. Im Sinne der Wiederverwendbarkeit stoßen solche Zusammenbauzeichnungen jedoch schnell an ihre Grenzen, da sich die manuell hinzugefügte Informationen nur schwer automatisiert auslesen und weiterverarbeiten (z.B. in digitalen Absicherungsuntersuchungen) lassen.

## Dokumentation am Zusammenbauobjekt

Eine weitere Möglichkeit, Verbindungsinformationen auf Ebene des Zusammenbaus zu dokumentieren, besteht darin, die Informationen direkt im Zusammenbauobjekt zu hinterlegen. Hier können sowohl die Relationen zu den Einzelteilen sowie zusätzliche Informationen gespeichert werden.

Wie in Abbildung 3.7 dargestellt, trägt der Zusammenbauknoten in einem Verbindungsobjekt Information über die verbundenen Bauteile sowie weitere Informationen, z.B. über den Verbindungsprozess. Die Relation zwischen dem Verbindungsobjekt und den Bauteilen ist in der Regel eine gerichtete Eltern-Kind-Beziehung. Das bedeutet, das Elternobjekt kennt alle Kind-Objekte, die zu ihm gehören, jedoch nicht umgekehrt.

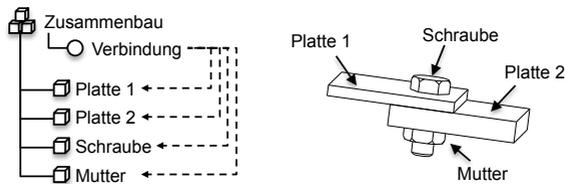


Abbildung 3.7.: Dokumentation von Verbindungen am Zusammenbauobjekt [Vie05]

Umgekehrt bedeutet es aber auch, dass die Kind-Objekte über keinerlei Verbindungsinformationen verfügen, solange diese nicht im Kontext des Elternobjekts verwendet werden. Diese Art der Dokumentation von Verbindungen wird im betrachteten Unternehmen beispielsweise im Karosserierohbau angewendet. Hier wird die Fertigungsstruktur in einer Zusammenbaustruktur abgebildet. Durch den kaskadie-

### 3. Grundlagen Verbindungen

---

renden Aufbau des gesamten Zusammenbaus lassen sich die einzelnen Fertigungsschritte/-stationen abbilden und mit den entsprechenden Fertigungsinformationen versehen. Dabei bildet eine Zusammenbaustufe genau eine Fertigungsstufe ab. Dieser Zusammenbau geht dann wiederum vollständig in die nächst höhere Zusammenbaustufe mit ein und wird dort um weitere Einzelteile ergänzt, bis letzten Endes der vollständige Karosserierohbau zusammengebaut vorliegt (siehe Abbildung 3.8).

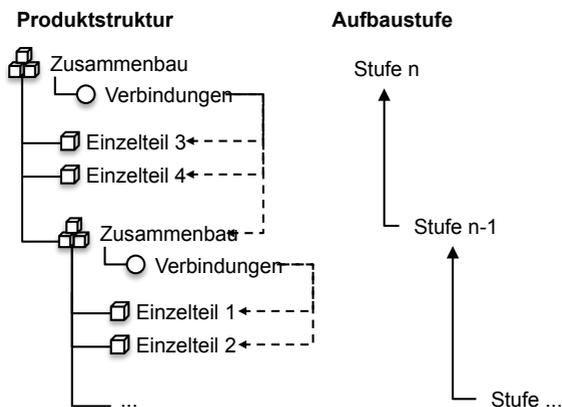


Abbildung 3.8.: Exemplarische Darstellung eines kaskadierenden Zusammenbaus

Je größer ein Zusammenbau wird, desto größer ist auch die Anzahl der zu dokumentierenden Verbindungen am übergeordneten Knoten. Nimmt man beispielsweise die Unterteilung eines Fahrzeugs in die Bereiche Karosserierohbau und Endmontageumfänge (z.B. Interieur und Exterieur) an, so wird relativ schnell klar, dass nahezu alle Verbindungen zwischen Komponenten des Interieurs/Exterieurs und des Karosserierohbaus auf der Ebene des höchsten Zusammenbauknotens doku-

mentiert werden müssten. Aus ersichtlichen Gründen erweist sich dieser Ansatz daher als ungeeignet, wenn sowohl Rohbau- als auch Endmontageverbindungen in komplexen Produkten auf die selbe Art und Weise dokumentiert werden sollen.

Zusätzlich gilt ein solcher Zusammenbau für genau eine einzige Fahrzeugvariante. Zwar erlaubt die Konstruktion mit Hilfe von Variantentabellen und anderen Hilfsmitteln CAD-seitig eine Abbildung mehrerer Varianten in einem einzigen Zusammenbau, eine solche Methode kann jedoch niemals die Anforderungen realer Fahrzeugprojekte hinsichtlich der geforderten Produktvarianz abdecken.

### **3.2.2. Dokumentation auf Ebene der Einzelteile**

Auch auf der Ebene unterhalb des Zusammenbaus können Verbindungsinformationen dokumentiert werden. Methodisch unterscheiden sich die unterschiedlichen Varianten nicht wesentlich voneinander. Daher wird exemplarisch auf die Dokumentation an einem der verbundenen Einzelteile (z.B. Verbindungspartner oder Verbindungshilfsmittel) und auf die Dokumentation in einem zusätzlichen Einzelteil eingegangen.

#### **Dokumentation an einem der Einzelteile**

Diese Form der Dokumentation nutzt die existierenden Elemente einer Baugruppe, um zusätzliche Informationen an einem der Bauteile zu speichern. Abbildung 3.9 zeigt exemplarisch eine Schrauben-Mutter-Verbindung, bei der die Schraube Information über die zu verbindenden Bauteile sowie zusätzliche Prozessinformationen trägt.

### 3. Grundlagen Verbindungen

---

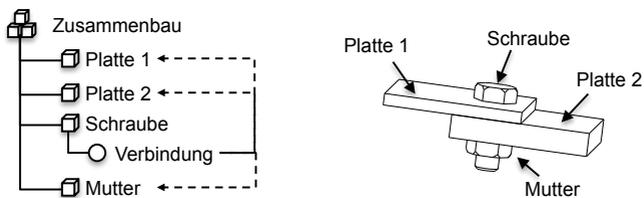


Abbildung 3.9.: Dokumentation von Verbindungsinformationen an einem der Bauteile einer Verbindung [Vie05]

Eine solche Verknüpfung auf Ebene der Einzelteile lässt sich beispielsweise mit Hilfe von Features realisieren. Features erlauben, 3D-Modelle von Bauteilen miteinander zu koppeln, so dass sich Parameter wie etwa der Durchmesser einer Schraube mit dem Durchmesser einer Durchgangsbohrung verknüpfen lassen. Solche assoziativen Verknüpfungen ermöglichen eine automatische Anpassung der verknüpften Parameter, sobald sich entweder der Durchmesser der Schraube oder der Durchmesser der Durchgangsbohrung ändert [Lis07, RWPM09].

Der Begriff des Features existiert bereits seit Ende der 80-er Jahre und beschreibt im Wesentlichen die Möglichkeit Geometrieinformationen mit zusätzlichen Semantikinformatoren zu erweitern [Bos07, HB00].

**Definition.** *Features sind informationstechnische Elemente, die Bereiche von besonderem (technischen) Interesse von einzelnen oder mehreren Produkten darstellen [VDI99a].*

Ein besonderes technisches Interesse kann beispielsweise ein Montage- oder eine Messinformation an einer bestimmten Stelle des Produktes sein. Letztlich steht die Bedeutung einer solchen Information immer mit einer spezifischen Lebensphase des Produktes in Zusammenhang und

lässt sich auch nur im Kontext einer solchen sinnvoll nutzen. Somit lassen sich im Fall einer Schraubverbindung neben der Verknüpfung der Einzelteile auch Informationen über den Montageprozess (z.B. Drehmoment, Toleranz) dokumentieren.

Diese Art der Dokumentation bietet insbesondere den Vorteil, dass Merkmale der Schraube (z.B. Fügerichtung, Schlüsselweite, etc.), direkt zur Erzeugung relevanter Simulationselemente herangezogen werden können. Zusätzlich kann dadurch jede Verbindung für sich explizit mit einem eindeutigen Kenner versehen werden.

Die dokumentierten Informationen sind in den meisten Fällen jedoch an das CAD-System und dessen natives Datenformat gebunden. Werden diese Informationen in einem anderen System als dem verwendeten CAD-System benötigt, müssen diese extrahiert werden. Darüber hinaus setzt diese Dokumentationsform auf das Vorhandensein eines bestimmten Bauteils. Fällt dieses informationstragende Bauteil weg, gehen auch alle dokumentierten Verbindungsinformationen verloren und müssen unter Umständen erneut angelegt werden. Treten mehrere Verbindungen mit unterschiedlichen Bauteilen im gleichen Zusammenbau auf, ist unklar, welche Einzelteile die Informationen für die vorhandenen Verbindungen tragen.

#### **Dokumentation an einem zusätzlichen Einzelteil / Objekt**

Neben der Dokumentation der Verbindungsinformationen in einem der Verbindungspartner oder -hilfsmittel können die Informationen auch in einem zusätzlichen Einzelteil oder Objekt dokumentiert werden (vgl. Abbildung 3.10). Diese Methode ermöglicht die Gruppierung von Verbindungsinformationen für mehrere Verbindungen im gleichen Zusam-

### 3. Grundlagen Verbindungen

---

menbau. Diese Gruppierung kann überall dort angewendet werden, wo Bauteile beispielsweise durch mehrere Verbindungspunkte miteinander verbunden werden (z.B. Verbindung zweier Bleche durch mehrere Schweißpunkte).

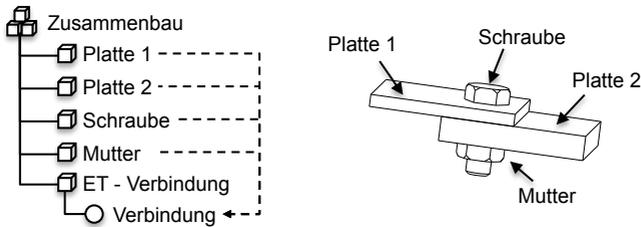


Abbildung 3.10.: Dokumentation von Verbindungsinformationen in einem zusätzlichen Einzelteil [Vie05]

Generic Assembly Objekte stellen eine Möglichkeit dar, um Verbindungsinformationen in einem eigenständigen Objekt zu verwalten. Diese Objekte tragen das Beziehungswissen über die verbundenen Bauteile sowie zusätzliche Informationen über den Fügeprozess oder Toleranzen. Sind die Verbindungsobjekte jedoch Teil der Zusammenbaustruktur, gelten die gleichen Vor- und Nachteile wie für die Dokumentation von Verbindungen am Zusammenbauknoten. Daher schlägt Vielhaber eine flache Bauteilstruktur vor, bei der sowohl die Einzelteile als auch die Generic Assembly Objects auf der gleichen Ebene dokumentiert werden [Vie05].

Diese Art der Dokumentation kann prinzipiell über beliebige Hierarchieebenen eines Zusammenbaus erstellt werden. Soll eine Verbindung jedoch konsistent gespeichert und wieder hergestellt werden, muss das informationstragende Einzelteil zum betrachteten Zusammenbau gehören, also unterhalb desselben Zusammenbauknotens wie die zu ver-

bindenden Einzelteile dokumentiert sein. Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass Einzelteile, welche ausschließlich Verbindungsinformationen tragen, aus prozesstechnischer Sicht zwar sehr wichtig sind, jedoch keine bestellbaren oder herstellbaren Einzelteile darstellen. Daher muss bei der späteren Verarbeitung der Zusammenbau- und Einzelteilinformationen sorgfältig darauf geachtet werden, diese Verbindungseinzelteile von den „normalen“ Einzelteilen zu separieren.

### **3.3. Verbindungsinformationen**

Dieser Abschnitt beschreibt die unterschiedlichen Informationsarten, welche bei der Dokumentation von Verbindungen zu berücksichtigen sind. Vor dem Hintergrund der digitalen Absicherung von Verbindungen, mit Bezug auf die unterschiedlichen Lebensphasen des Produktes, spielen insbesondere die folgenden Informationsarten eine Rolle:

- Geometrische Informationen
- Referenzelemente
- Meta-Informationen

#### **3.3.1. Geometrische Informationen**

Eine Verbindung besteht aus den zu verbindenden Einzelteilen und ggf. zusätzlichen Verbindungshilfsmitteln/-stoffen. Daher werden diese Informationen bei der Dokumentation von Verbindungen ebenfalls erfasst. In heutigen CAD-Systemen kann diese Information mit Hilfe von Verknüpfungen gespeichert werden. Das bedeutet, eine Verbindung ver-

weist (referenziert) auf die relevanten Einzelteile. Die Information über die Einzelteile wird bei der digitalen Absicherung aus zwei Gründen benötigt. Zum Einen stellt jede Geometrie innerhalb eines betrachteten Bauraums eine Störkontur dar. An Störkonturen kann es zu Kollisionen zwischen Werkzeugen, anderen Bauteilen oder dem Monteur kommen. Zum Anderen gibt beispielsweise die Geometrie eines Schraubkopfes in einer digitalen Absicherung vor, welche Werkzeuge bzw. Werkzeugarten verwendet werden können.

#### 3.3.2. Referenzelemente

Die Darstellung einer Verbindung in einem CAD-Modell kann auf zwei Arten erfolgen: als tatsächliche Geometrie oder als Referenzelement. Kommen zusätzliche Verbindungshilfsmittel (z.B. Schraubverbindung) zum Einsatz, so findet man die tatsächliche Geometrie der Einzelteile im CAD-Modell. Referenzelemente werden eingesetzt, wenn es keine geometrischen Verbindungselemente gibt, d.h. eine Verbindung beispielsweise mit Verbindungshilfsstoffen gefügt wird.

Referenzelemente tragen in diesem Fall vor allem Informationen wie Lage und Orientierung. Die Lage eines Referenzelementes beschreibt dessen Lage ( $x$ -,  $y$ -,  $z$ -Koordinaten) im Bauraum des Produktes. Diese Koordinaten können entweder relativ zu anderen Bauteilen oder absolut in Bezug zum Fahrzeugkoordinatensystem angegeben werden. Die Orientierung gibt zusätzlich einen Richtungsvektor an, welcher als Anhaltspunkt dient, in welcher Richtung ein Fügeprozess erfolgen soll.

Wie in Abbildung 3.11 dargestellt, lassen sich durch einzelne oder gruppenweise Anordnung von Referenzelementen unterschiedliche Verbindungsarten darstellen. Dabei kann die Darstellung der Verbindung

prinzipiell als reale, geometrische Objekte oder durch gruppierte, diskrete Referenzelemente abgebildet werden. Handelt es sich um eine punktförmige Verbindung, genügt ein einzelnes Referenzelement. Linienförmige Verbindungen, wie etwa Schweiß- oder Klebenähte lassen sich durch eine Reihe von Referenzelementen abbilden. Auf die gleiche Art können auch flächenförmige Ausprägungen von Verbindungen durch Referenzelemente gebildet werden.

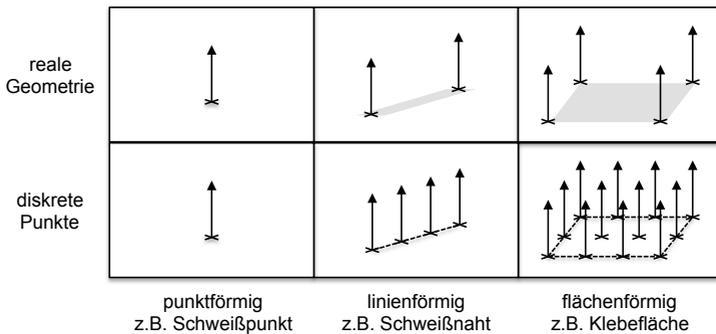


Abbildung 3.11.: Abbildung unterschiedlicher Verbindungsgeometrien mit Hilfe von Referenzelementen

### 3.3.3. Meta-Informationen

Meta-Informationen sind notwendig, um Verbindungen weiter zu charakterisieren. Diese Informationen spielen beispielsweise eine Rolle, um Verbindungen eindeutig zu identifizieren oder Informationen über Prozesse in bestimmten Lebensphasen zu dokumentieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden insbesondere die folgenden Informationsarten betrachtet:

- Verbindungsart
- Prozessinformationen
- Identifikationsnummer

#### **Verbindungsart**

Gemäß Abbildung 3.1 auf Seite 54 lassen sich feste nicht-lösbare Verbindungen in mehrere Kategorien unterteilen. Jede Verbindungsart kann unterschiedlich aufgebaut sein (z.B. mit oder ohne Verbindungshilfsmittel/-stoff). Damit eng verknüpft ist auch der geometrische Aufbau der jeweiligen Verbindung sowie die notwendigen Prozessparameter. Daher wird die Verbindungsart als Kriterium benötigt, um die richtigen Parameter zur Dokumentation auszuwählen.

Eine Schraubverbindung gehört zur Kategorie der festen, lösbaren Verbindungen mit Zusatzteil(en). Daher werden bei dieser Verbindungsart nicht nur die zu verbindenden Bauteile, sondern auch die geometrisch vorhandenen Zusatzteile dokumentiert (z.B. Schraube, Mutter oder Unterlegscheibe). Bezogen auf die geometrische Absicherung spielt der Schrauben- und Mutterkopf eine besondere Rolle, da dieser für Werkzeuge zugänglich sein müssen. Betrachtet man den Herstellprozess und die geforderte Festigkeit der Verbindung, spielen weitere Parameter wie das Drehmoment oder die Drehmomenttoleranz eine wichtige Rolle für die Dauerfestigkeit der Verbindung [Res06]. Um diese zu ermitteln und in Untersuchungen zu bestätigen, wird auch die angenommene Belastung der Verbindung benötigt (z.B. geforderte Zugfestigkeit).

#### **Prozessinformationen**

Da eine Verbindung, wie auch das Produkt, in dem diese vorkommt, im Laufe ihres Lebens unterschiedliche Phasen durchläuft, spielen auch unterschiedliche verbindungsorientierte Prozesse in diesen Lebensphasen eine wichtige Rolle. Daher sind Prozessinformationen ein wesentlicher Bestandteil der Dokumentation von Verbindungen. Indem diese dokumentiert und im Laufe der Produktentwicklung vervollständigt werden, kann auch eine Absicherung der unterschiedlichen Prozesse (z.B. Montage im Prototypenbau, Serienmontage, Demontage während einer Wartung) durchgeführt werden. Prozessinformationen sind damit eng an die unterschiedlichen Lebensphasen gekoppelt. Je nachdem, in welchem Kontext eine Absicherung stattfinden soll, können die gespeicherten Prozessinformationen eindeutig einem Lebensabschnitt und damit einem Kontext zugeordnet werden.

#### **Identifikationsnummer**

Werden Verbindungen nicht durch ein eigenes Verbindungsmodell mit Referenzelementen dokumentiert, erfolgt im CAD-System keine zusätzliche Kennzeichnung von Verbindungen. Dadurch wird eine eindeutige Zuordnung von Informationen zu den Einzelteilen einer Verbindung erschwert. Eine Identifikationsnummer (ID) ermöglicht ein eindeutiges Wiederfinden von Verbindungen und den zugehörigen Informationen. Außerdem lassen sich Prozess- und Absicherungsinformationen besser zuordnen, wenn alle Verbindungen einen eindeutigen Kenner tragen.

## 3.4. Variantenmanagement für Verbindungen

Für Verbindungen bedeutet Varianz, dass sich die Zuordnung zu Bauteilen verändert. Dadurch kann es auch zu Änderungen der Prozesse kommen, mit denen diese Bauteile gefügt werden. Durch die Veränderung des Werkstoffs oder der Dicke der Verbindungspartner ändern sich beispielsweise die Parameter, mit denen diese Verbindung prozesssicher hergestellt werden kann [Res06]. Darüber hinaus kann sich, abhängig von der jeweiligen Produktvariante, auch die Anzahl der Verbindungspunkte ändern. Im Karosserierohbau ändern sich beispielsweise die Lage oder die Anzahl der Verbindungspunkte, abhängig von den zu verbindenden Bauteilen (z.B. Dachblech mit und ohne Schiebedach).

Wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert, können Verbindungsinformationen auf der Ebene des Zusammenbauobjekts oder der Ebene der Einzelteile dokumentiert werden. Beide Varianten bieten unterschiedliche Möglichkeiten variantenbehaftete Strukturen zu erzeugen und zu konfigurieren. Diese werden nachfolgend erläutert und die jeweiligen Vor- und Nachteile erklärt.

### 3.4.1. Verbindungsinformationen auf Ebene des Zusammenbaus

Diese Art der Dokumentation wird verwendet, wenn alle Verbindungsinformationen auf dem übergeordneten Zusammenbauknoten gespeichert werden (vgl. Abschnitt 3.2.1 auf Seite 63). Im betrachteten Unternehmen wird diese Methode beispielsweise bei der Dokumentation von Verbindungspunkten im Karosserierohbau verwendet. Diese liegen meist nicht als eigenständige Geometrie vor, sondern werden lediglich durch Referenzelemente dargestellt. Der Zusammenbauknoten trägt in

diesem Fall die Verbindungsinformationen für alle Produktvarianten. Da die Konfiguration in einem PDM-System lediglich bis zur Ebene der Zusammenbauten bzw. Einzelteile, jedoch nicht innerhalb von diesen wirkt, kann keine Konfiguration der Verbindungspunkte durchgeführt werden. Wird nun eine der beiden Produktvarianten im PDM-System konfiguriert, werden nicht alle Bauteile geladen, für die im Zusammenbauknoten Verbindungspunkte hinterlegt werden (siehe Abbildung 3.12). Somit zeigen auch die Verknüpfungen auf die nicht vorhandenen Bauteile „ins leere“ (siehe Abbildung 3.12, hellgraue Punkte). Dieses Problem kann dadurch umgangen werden, dass für jede Produktvariante ein eigener Zusammenbau erzeugt wird, der anschließend auch im PDM-System konfiguriert werden kann. Damit ist jedoch ein hoher Änderungs- und Pflegeaufwand verbunden.

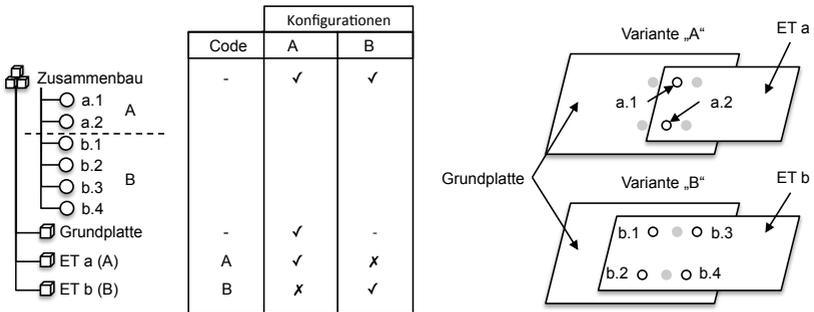


Abbildung 3.12.: Variantenmanagement bei der Dokumentation von Verbindungsinformationen auf der Ebene des Zusammenbaus [Vie05]

### 3.4.2. Verbindungsinformationen auf Ebene der Einzelteile

Als zweite Möglichkeit können variantenbehaftete Verbindungen auf Ebene der Einzelteile dokumentiert werden. Dazu werden diese entweder in eigenständigen Objekten oder in zusätzlichen Einzelteilen dokumentiert (vgl. Abschnitt 3.2.2 auf Seite 67). Diese Objekte tragen dabei sowohl die Referenzen zu den Verbindungspartnern als auch zusätzliche Prozessinformationen. Für jede Produktvariante wird ein eigenes Verbindungsmodell erzeugt.

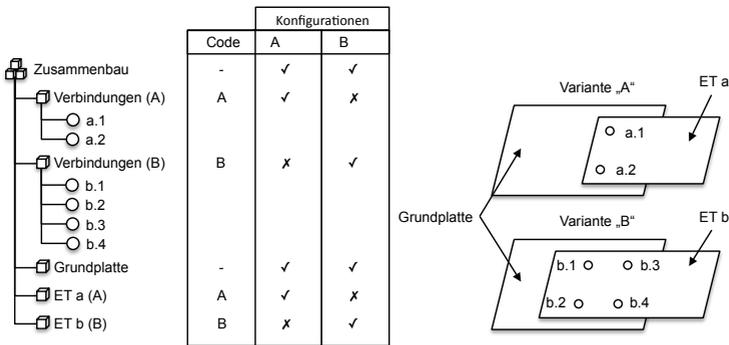


Abbildung 3.13.: Variantenmanagement bei der Dokumentation Verbindungsinformationen auf Ebene der Einzelteile [Vie05]

Je nach Produktkonfiguration können innerhalb der vorhandenen Logik eines PDM-Systems die Einzelteile konfiguriert und angezeigt werden. Es werden nur Verbindungen angezeigt, die tatsächlich relevant sind. Gelten Verbindungspunkte für mehr als eine Variante, können diese in einem eigenen Verbindungsobjekt angelegt werden, welches bei allen Produktvarianten angezeigt wird. Die variantenbehafteten Verbindungsobjekte beinhalten dann die zusätzlichen Verbindungspunkte.

## 3.5. Absicherung von Verbindungen

Die Absicherung von Verbindungen während der Produktentwicklung erfolgt unter verschiedenen Aspekten. Neben rein rechnerischen Verfahren gibt es auch geometrische Absicherungen mit Hilfe von Simulationen. Zu den rechnerischen Verfahren zählen hauptsächlich Auslegungs- und Festigkeitsberechnungen. Simulationsverfahren umfassen beispielsweise statische und dynamische Kollisionsuntersuchungen zwischen den verbauten Einzelteilen, Verbindungshilfsmitteln sowie den verwendeten Werkzeugen oder Handhabungsvorrichtungen in bestimmten Montage- oder Demontagesituationen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden vorrangig Simulationsverfahren zur digitalen, geometrischen Absicherung von Montage- bzw. Demontageprozessen betrachtet. Bezogen auf die unterschiedlichen Verbindungsarten unterscheiden sich die eingesetzten Simulationsmethoden nicht wesentlich voneinander. Daher werden die unterschiedlichen Verfahren nachfolgend am Beispiel von Montageverbindungen erläutert. Die getroffenen Aussagen sind jedoch auch auf andere Verbindungsarten (z.B. Karosserierohbauverbindungen) übertragbar.

### 3.5.1. Simulation

**Definition.** *Simulation hat zum Ziel, die Kenntnisse über vorliegende Systeme zu erhöhen und durch gezielte Modellveränderungen zu einer Verbesserung des Systems zu gelangen [VDI96].*

Basis für eine Simulation ist ein simulations- oder experimentierfähiges Modell. Abhängig von der Art der Simulation kann dieses Modell als

reales oder gedachtes System Zielzustände entweder sehr abstrakt oder realitätsnah abbilden. Um bewerten zu können, wie sich das Produkt auf unterschiedliche x-Systeme auswirkt, bzw. wie die unterschiedlichen x-Systeme das Produkt beeinflussen, kann deren Zusammenspiel in einem experimentierfähigen Modell nachgebildet werden. Simulationsmodelle helfen Entwicklern und Planern Rückschlüsse auf das Verhalten eines Systems in der Wirklichkeit zu ziehen. Simulationen erlauben also durch gezieltes Vorbereiten, Durchführen und Auswerten von experimentierfähigen Modellen das zeitliche Ablaufverhalten von komplexen Systemen zu untersuchen.

Effizienz und Zuverlässigkeit von Simulationsmodellen hängen dabei maßgeblich von der Vorbereitung des Experiments ab [VDI97]. Wie in Abbildung 3.14 dargestellt, beginnt eine Simulation mit der Erstellung des Simulationsmodells. Daran schließt sich die Planung der notwendigen Experimente an. Bereits während der Planung kann ermittelt werden, ob alle relevanten Systemdaten für die geplante Simulation vorliegen oder ob das Simulationsmodell noch erweitert werden muss. Gleichzeitig muss in dieser Phase die theoretisch mögliche Anzahl an Simulationsläufen, bezogen auf die vorliegende Fragestellung, auf ein sinnvolles Maß reduziert werden.

Liegen alle Informationen vor, kann mit der Durchführung der Simulationsläufe begonnen werden. Die Informationen, die jeder Simulationslauf liefert, werden in einer anschließenden Auswertung aufbereitet, interpretiert und bewertet. Die Auswertung erfolgt entweder offline, also nach der Durchführung der Simulationsläufe, oder online, d.h. während der Simulationsläufe. In beiden Fällen fließen die hierbei gewonnen Erkenntnisse wieder in das Simulationsmodell bzw. das eigentliche Produkt zurück.

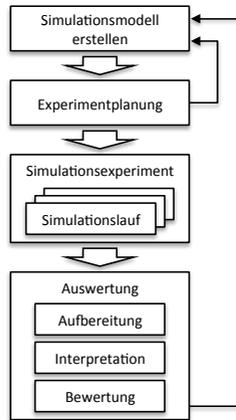


Abbildung 3.14.: Einordnung von Modellerstellung, Experimentplanung und Auswertung in die allgemeine Vorgehensweise bei einer Simulation [VDI97]

Gerade im Bereich der Produktentwicklung kann die Auswertung von Simulationsergebnissen durch eine geeignete Visualisierung unterstützt werden. Durch die visuelle Informationsaufbereitung oder eine Interaktion mit dem Simulationsmodell während einer online Auswertung wird in vielen Fällen das Verständnis für komplexe, dynamische Sachverhalte gefördert. Zusätzlich können die Informationen auch auf Basis statischer Tabellen oder Diagrammen aufbereitet werden. Prinzipiell erhöht eine adäquate Visualisierung die Anschaulichkeit eines Modells und bildet dadurch eine Kommunikationsgrundlage für die interdisziplinären Personenkreise (z.B. Konstrukteure, Produktionsplaner, Lieferanten, etc.), welche an einer Simulation beteiligt sind [VDI09].

#### 3.5.2. Digitale Baubarkeit

Eine Ausprägung von Simulationen, welche zur Analyse von Montageverbindungen eingesetzt wird, ist die digitale Baubarkeit.

**Definition.** *Die digitale Baubarkeit untersucht sowohl die Einzelteile des Produktes in Einbaulage (statische Baubarkeitsuntersuchung) als auch die Bewegungspfade der Einzelteile bis zum Erreichen der Einbaulage, inklusive der hierfür benötigten Fügevorrichtungen/-werkzeuge (dynamische Baubarkeitsuntersuchung) bezüglich Kollisionen mit den umgebenden Bauteilen.*

#### Statische Baubarkeitsuntersuchungen

Die statische Analyse auf Kollisionen zwischen den Bauteilen in Einbaulage gehört zu den Verfahren, welche frühzeitig Probleme bei der Produktgestaltung identifizieren können. Dazu werden anhand ausgewählter Produktvarianten die Einzelteile und Baugruppen dahingehend geprüft, ob es zu Kontakt oder berechtigten/unberechtigten Überschneidungen kommt. Berechtigte Überschneidungen liegen beispielsweise bei Durchdringungen von Schrauben- oder Klemmverbindungen vor. Diese werden vorab identifiziert und durch geeignete Filtermechanismen aus der Untersuchung ausgeschlossen. Die übrigen Kollisionen werden anschließend durch die Konstrukteure bewertet und ggf. gelöst. Abbildung 3.15 zeigt am Beispiel einer Schraubverbindung die möglichen Kontakte und Überschneidungen.

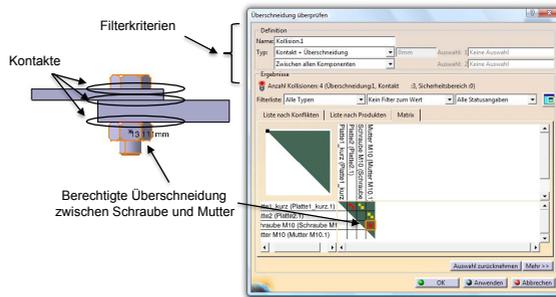


Abbildung 3.15.: Beispiel einer Kollisionsanalyse im CAD-System CATIA V5 der Firma Dassault Systèmes

Aufgrund der hohen Dynamik des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses und der hohen Anzahl der beteiligten Konstrukteure in einem Fahrzeugprojekt kommt es immer wieder zu Änderungen an der Produktgeometrie. Um die Veränderung des Produktes über die Zeit nachzuvollziehen bedient man sich der Differenzanalyse. Diese ermöglicht es, unterschiedliche Entwicklungsstände eines Produktes auf geometrische Änderungen zu überprüfen und diese zu visualisieren. Eingefärbte Bereiche zeigen dabei an, an welchen Bauteilgeometrien es zu Veränderungen im Vergleich zur vorherigen Bauteilversion gekommen ist. Diese Bereiche können anschließend noch einmal untersucht werden, um zu überprüfen, ob neue Kollisionen auftreten bzw. ob frühere Kollisionsprobleme behoben wurden.

Die hohen Datenmengen, welche dabei verarbeitet werden müssen, erlauben es jedoch nicht, dass diese Untersuchungen direkt auf dem PDM-System oder am CAD-System des Konstrukteurs stattfinden. Statt dessen werden bestimmte Fahrzeugkonfigurationen heruntergeladen und in separaten Dateiverwaltungssystemen der Berechnung zur Verfügung ge-

stellt. Die betrachteten Fahrzeugkonfigurationen können beispielsweise Fahrzeuge mit besonders vielen Ausstattungsmerkmalen (so genannte Maximalkonfigurationen) sein. Oder es handelt sich um Kombinationen von Ausstattungen, bei denen erfahrungsgemäß aus früheren Baureihen bekannt ist, dass Probleme zu erwarten sind. Da die Berechnung lediglich Hüllgeometrien der Bauteile benötigt, genügt es in vielen Fällen eine vereinfachte Repräsentation der Konstruktionsdaten zu verwenden. Dazu werden die nativen CAD-Daten über einen Konvertierungsprozess in ein Ersatzformat überführt, welches anschließend in die Berechnung eingeht.

#### **Dynamische Baubarkeitsuntersuchungen**

Kollisionsanalysen unter Berücksichtigung des Montageprozesses gehen einen Schritt weiter. Die Einzelteile werden nicht ausschließlich in ihrer endgültigen Einbaulage im Fahrzeug betrachtet. Zusätzlich wird auch der Bewegungspfad, über den die Einzelteile während des Montageprozesses dorthin gelangen, analysiert. Dazu werden die Einzelteile gemäß der aktuell gültigen Montagereihenfolge eingeblendet und geprüft, ob diese kollisionsfrei in ihre Einbaulage gebracht werden können. Diese Art der Untersuchung bezieht sich sozusagen auf die letzten Zentimeter und den zur Verfügung stehenden Arbeitsraum, bevor ein Bauteil seine Einbaulage erreicht (siehe Abbildung 3.16). Dabei werden sowohl die bereits verbauten Bauteile als auch die notwendigen Hilfsmittel, wie etwa Handhabungsvorrichtungen, Halterungen oder Werkzeuge mit berücksichtigt, welche als Störgeometrien bezeichnet werden.

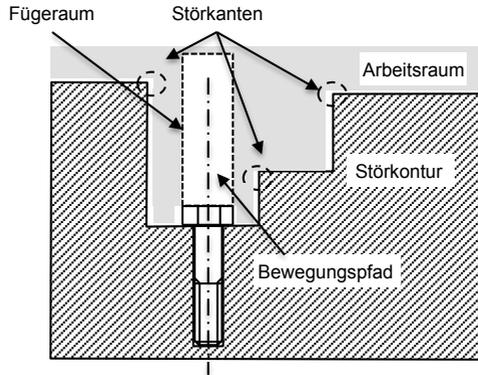


Abbildung 3.16.: Erforderliche Freiräume beim Fügen einer Schraube [LW06]

### 3.6. Fazit

Um die gewünschten Funktionen, Herstellbarkeit, Wartbarkeit, etc. eines Produktes sicherzustellen werden Verbindungen benötigt. Insbesondere feste Verbindungen, welche den größten Anteil an den vorkommenden Verbindungen in einem Produkt ausmachen. An diese festen Verbindungen werden aus allen Lebensphasen des Produktes unterschiedliche Anforderungen gestellt, welche während der Produktentstehung berücksichtigt werden. Die Validierung dieser Anforderungen erfolgt vermehrt anhand digitaler Produktmodelle, weshalb hohe Anforderungen an die Qualität der zugrundeliegenden Produktinformationen gestellt werden.

### 3. Grundlagen Verbindungen

---

Bezogen auf Verbindungen werden daher erhöhte Anforderung an deren Dokumentation gestellt. Dabei geht es in erster Linie darum, wie Verbindungsinformationen im Produktdatenmodell repräsentiert werden. Dies kann entweder durch die tatsächlichen Geometrien der Verbindungspartner oder aber mit Hilfe von Referenzelemente erzielt werden, falls es keine eigenständige 3D-Geometrie gibt.

Neben den geometrischen Unterschieden von lösbaaren und nicht-lösbaaren, festen Verbindungen wird jede Verbindungsart auch durch unterschiedliche Informationen beschrieben (z.B. Prozessparameter). Diese Informationen sind in einem zu entwickelnden Informationsmodell ebenfalls zu berücksichtigen.

Da sich die Absicherung eines Produktes auch mit den unterschiedlichen Ausprägungen des Produktes auseinandersetzt, spielt auch die Produktvarianz eine entscheidende Rolle. Dabei unterscheidet sich die Dokumentation von Verbindungen auf Ebene des Zusammenbaus erheblich von der Dokumentation von Verbindungen auf Ebene der Einzelteile.

Die Dokumentation von Verbindungen erfolgt maßgeblich vor dem Hintergrund der frühzeitigen Absicherung von Verbindungen im Produktentstehungsprozess. Mit Hilfe von Simulationen können sowohl die einzelnen Verbindungspartner als auch die notwendigen Montage- bzw. Demontageprozesse simuliert werden. Dazu zählen beispielsweise statische und dynamische Kollisionsuntersuchungen.

## **4. Verbindungen im Produktentstehungsprozess**

Das nachfolgende Kapitel beleuchtet den Produktentstehungsprozess eines Unternehmens in der Automobilindustrie. Fokus liegt auf der Erstellung, Dokumentation und Validierung von festen Verbindungen, bezogen auf die unterschiedlichen Produktlebensphasen. Darüber hinaus werden auch die eingesetzten Methoden, Systeme und Informationsarten betrachtet.

### **4.1. Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie**

Wie bei den meisten Automobilherstellern wird im betrachteten Unternehmen der Produktentstehungsprozess durch ein Phasen-Meilenstein-Modell abgebildet (siehe Abbildung 4.1). Aufgrund der Aufteilung des Fahrzeugs auf unterschiedliche Bauteilverantwortliche (z.B. Fahrwerk, Karosserie, Elektrik, usw.) ermöglicht dieses Modell eine Synchronisation der unterschiedlichen Entwicklungsstände zu definierten Zeitpunkten. In der Automobilindustrie kann die Dauer eines Entwicklungsprojektes zwischen drei und fünf Jahren betragen. In welchen Intervallen sich dieser Prozess wiederholt, ist branchen- und produktabhängig. In der Automobilindustrie wird etwa alle sieben Jahre ein

#### 4. Verbindungen im Produktentstehungsprozess

vollständig überarbeitetes Modell eines Produktes auf den Markt gebracht [Web09].

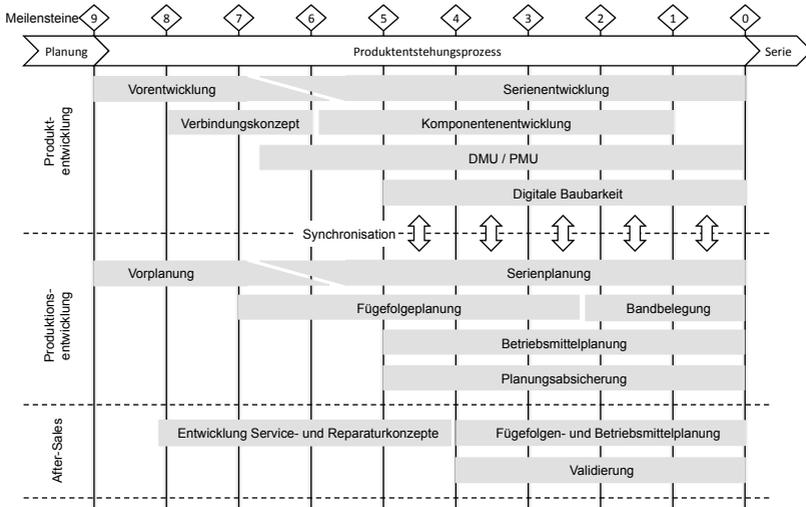


Abbildung 4.1.: Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie

Innerhalb des Produktentstehungsprozesses werden alle Aktivitäten zur Entwicklung und Absicherung des Produktes koordiniert. Zu definierten Zeitpunkten (Meilensteinen) erfolgen umfassende Analysen, in denen das Zusammenspiel von Produkt und Produktionssystem validiert wird. Parallel dazu erfolgen auch weitere Entwicklungsaktivitäten, die sich auf andere Lebensphasen beziehen (z.B. After-Sales). D.h. hier werden auch Wartungsumfänge analysiert und im Zusammenspiel mit der Produktentwicklung optimiert. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Entwicklungs- und Absicherungsaktivitäten während des Produktentstehungsprozesses, bezogen auf feste Verbindungen beschrieben und analysiert.

#### **4.1.1. Entwicklung von Verbindungen**

Die Entwicklung beginnt mit der Erstellung erster Produktentwürfe und Verbindungskonzepte. Dabei stehen die Fahrzeugarchitektur, das Design und die zu verwendenden Basistechnologien (z.B. Füge-technologie) im Vordergrund. So spielen einerseits funktionale Aspekte (z.B. Verbrauchswerte, Luftwiderstand oder Sicherheitsfunktionen) sowie andererseits produktionsorientierte Aspekte (z.B. Kosten, Zeit, fehlerfreie Montage) eine wichtige Rolle. Während der Erstellung des Maßkonzeptes werden die grundlegenden Hauptinnen- und -außenmaße des Fahrzeugs festgelegt. Durch die räumliche Anordnung der bereits entwickelten Komponenten der einzelnen Gewerke (z.B. Karosserie, Fahrwerk, Antriebsstrang, Interieur, Exterieur) kann bereits frühzeitig die Einhaltung des Maßkonzepts überprüft werden. Parallel dazu beginnt die Produktionsplanung mit der Erstellung erster Montagekonzepte für diese Komponenten. Hier fließen Produktinformationen ein, um beispielsweise eine erste, grobe Montagereihenfolge zu definieren. Diese dient als Anhaltspunkt für eine Abschätzung der Dimensionen und Kosten der notwendigen Montageanlagen. Die Planungsaktivitäten lassen sich in zwei Bereiche unterteilen: Karosserierohbau und Endmontage. Der Karosserierohbau ist durch einen hohen Automatisierungsgrad geprägt, weshalb hier der Fokus zu einem Großteil auf der Planung von Robotern für Transport- und Fügeaufgaben liegt. Im Gegensatz dazu sind bei der Planung der Endmontage eine Vielzahl manueller Tätigkeiten zu berücksichtigen, welche auch durch Automatisierungstechnik (z.B. Handhabungsvorrichtungen oder Fügewerkzeuge) unterstützt sein können. Der Grad der Automatisierung variiert von Produktionsstandort zu Produktionsstandort. Beeinflusst wird der Automatisierungsgrad durch Faktoren, wie etwa verfügbare Lieferanten und Hersteller oder lokale Kostenstrukturen.

Zeitgleich beginnt auch der After-Sales damit, Service- und Reparaturprozesse zu definieren. Die hierbei betrachteten Montage- bzw. Demontageprozesse unterliegen noch einmal anderen Randbedingungen wie in der Produktion. Dies liegt primär am hohen Anteil manueller Tätigkeiten und dem geringen Grad an automatisierten Werkzeugen. Darüber hinaus wird das Produkt nach anderen Gesichtspunkten (z.B. austauschbare Baugruppen) gegliedert. Solche Entscheidungen werden vorrangig unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten getroffen, um die Wartung des Produktes so effektiv und kostengünstig wie möglich zu gestalten.

##### **4.1.2. Absicherung von Verbindungen**

Wie bereits in Abschnitt 3.5 auf Seiten 79 dargestellt, werden im Rahmen dieser Arbeit vorrangig digitale, geometrische Absicherungen von Verbindungen betrachtet. Daher befassen sich die nachfolgenden Beschreibungen primär mit der produktionsorientierten Absicherung von Verbindungspartnern, Verbindungshilfsmitteln und Werkzeuggeometrien. Um den aktuellen Entwicklungsstand des Produktes und der Produktionsanlagen bewerten zu können, werden diese sowohl separat, als auch in interdisziplinären Workshops (z.B. Digitale Baubarkeit) anhand digitaler Simulationsmodelle validiert. Änderungsvorschläge an das Produkt oder an die verwendete Verbindungstechnik fließen unmittelbar in die Entwicklung zurück. Erst später werden diese Untersuchungen an realen Fahrzeug- bzw. Anlagenaufbauten getestet. Im Vordergrund stehen insbesondere Kollisionsuntersuchungen zwischen Bauteilgeometrien und Geometrien der Produktionsanlagen. In Abschnitt 4.2.3 auf Seite 95 wird daher exemplarisch die digitale Werkzeugabsicherung beschrieben.

## 4.2. Methoden

Im Rahmen dieser Arbeit sind zwei Methoden von Bedeutung. Zum Einen die Dokumentation von Verbindungsinformationen und zum Anderen die Nutzung dieser Informationen zur Absicherung von Produkteigenschaft, bezogen auf die unterschiedlichen Lebensphasen. Grundlage für beides ist zunächst die Erstellung von Verbindungen, welche daher zuerst betrachtet wird.

### 4.2.1. Erstellung von festen Verbindungen

Die Erstellung von Verbindungen erfolgt in mehreren Schritten. Nachdem die grundlegenden Verbindungskonzepte für das Produkt definiert sind, erfolgt zunächst eine Berechnung und Auslegung der einzelnen Verbindungen. Damit sind die Dimensionen der Bauteile sowie die Art und Charakteristik der benötigten Verbindungshilfsmittel bekannt. Das bedeutet, ab diesem Zeitpunkt können Verbindungen auch in Form von 3D-Geometrie konstruiert werden.

In den frühen Phasen der Produktentwicklung ist das Produkt permanenten Änderungen unterworfen. Diese betreffen sowohl die Geometrie der Einzelteile als auch die Lage der Einzelteile und Baugruppen im Gesamtprodukt. Hinzu kommt noch eine weitere Komplexität aufgrund der hohen Produktvarianz, welche ebenfalls zu Geometrie- bzw. Lageänderungen führen kann. Verbindungen werden in dieser Phase nicht immer vollständig als digitales Modell erstellt, da jede Änderung an den Bauteilen auch zu Änderungen an den Verbindungen führen kann. Aus diesen Gründen werden zwar alle Verbindungselemente im Produkt verbaut, ihre Positionierung erfolgt jedoch erst sehr spät im Produktent-

stehungsprozess. Solche unpositionierten Bauteile befinden sich dann am Nullpunkt des Koordinatensystems des Fahrzeugs<sup>1</sup>. Aufgrund der geringen Bedeutung der geometrischen Lage der Verbindungselemente in der Vergangenheit führten nicht-positionierten Verbindungselement selten zu Problemen in der Produktentwicklung. Mit der zunehmenden Bedeutung der digitalen Absicherung der unterschiedlichen x-System steigen jedoch die Anforderungen an die zugrunde liegenden Daten. Daher wird immer stärker auf die korrekte Positionierung von Verbindungselemente geachtet, da auch diese immer stärker in Absicherungsuntersuchungen einbezogen werden.

Der Aufwand bei der Positionierung von Verbindungselementen ist vergleichsweise hoch, da es sich um sehr kleine Elemente handelt und diese im CAD-System über sehr weite Wege bewegt werden müssen (z.B. vom Motorraum zum Heck des Fahrzeugs). CAD-Systeme stellen hierfür verschiedene Funktionen zur Verfügung, wie etwa Transformationen in x-, y- und z-Richtung oder Kompassfunktionen. Diese erfordern jedoch ein permanentes Verändern des Blickwinkels, da das Verbindungshilfsmittel nach dem Verschieben evtl. von anderen Bauteilen verdeckt wird. Aufgrund der Darstellung des Produktes am Monitor lässt sich nicht genau abschätzen, wo genau sich ein Bauteil auf der Blickachse befindet. Wie in Abbildung 4.2 dargestellt, kann es dadurch immer wieder zum „Verschwinden“ von Bauteilen kommen, wenn eine Szene im CAD-System gedreht wird, da die Tiefe einer Szene nicht sicher abgeschätzt werden kann.

---

<sup>1</sup>Im betrachteten Unternehmen liegt dieser Koordinatenursprung beispielsweise im Motorraum, in der Nähe der Ölwanne.

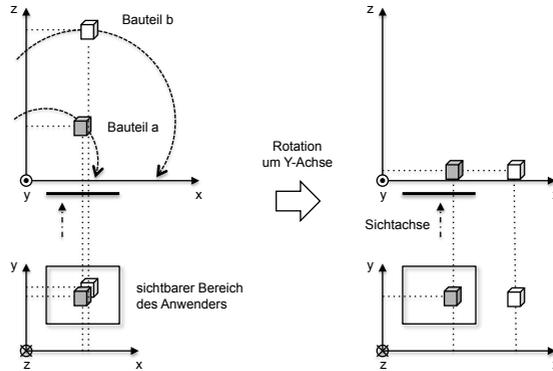


Abbildung 4.2.: Veränderung einer 3D-Szene durch Rotation um die Y-Achse, Bauteil b bewegt sich dabei aus dem sichtbaren Bereich heraus

#### 4.2.2. Dokumentation von Verbindungen

Die Dokumentation von Verbindungen erfolgt nach unterschiedlichen Gesichtspunkten. Einerseits gibt es Verbindungen im Bereich des Karosserierohbaus (feste, nicht-lösbare Verbindungen), welche nicht durch eigenständige geometrische Elemente im CAD- bzw. PDM-System repräsentiert werden. Daher werden diese Verbindungen über Referenzelemente dargestellt. Andererseits existieren Verbindungsarten die vollständig, d.h. inklusive ihrer Verbindungshilfsmittel geometrisch repräsentiert werden. Dabei handelt es sich in den meisten Fällen um Montageverbindungen (feste, lösbare Verbindungen).

### **Feste, nicht-lösbare Verbindungen**

Zu den Verbindungsarten in der Kategorie feste, nicht-lösbare Verbindungen zählen insbesondere Schweiß- und Klebeverbindungen. Diese besitzen im PDM-System keine eigene geometrische Repräsentation. Daher wurde eine Dokumentationsmethodik entwickelt, die diese Verbindungen über Referenzelemente (vgl. Abschnitt 3.3.2 auf Seite 72) abbildet und es erlaubt, zusätzliche Prozessinformationen für die einzelnen Verbindungspunkte zu hinterlegen. Die Dokumentation der so erstellten Punktwolken erfolgt auf Ebene des übergeordneten Zusammenbaus (vgl. Abschnitt 3.2.1 auf Seite 63).

Auch wenn die einzelnen Verbindungspunkte nicht als eigenständige Objekte im PDM-System verfügbar sind, bietet diese Art der Dokumentation Vorteile bei der Simulation von Fügeprozessen. Dabei können die Referenzelemente der einzelnen Verbindungspunkte genutzt werden, um beispielsweise Schweißzangen oder andere Werkzeuge automatisiert zu positionieren und Zugänglichkeitsuntersuchungen durchzuführen.

### **Feste, lösbare Verbindungen**

Feste, lösbare Verbindungen, wie etwa Schrauben- oder Schnappverbindungen werden nicht explizit als Verbindungen in den Systemen der Produktentwicklung dokumentiert. Diese Verbindungsarten werden lediglich durch ihre Einzelteile im CAD-Modell repräsentiert bzw. im PDM-System archiviert. Daher ist die Dokumentation dieser Verbindungen auf die Positionierung der Elemente der Verbindung (Verbindungspartner + Verbindungshilfsmittel) begrenzt. Das bedeutet umgekehrt, dass Änderungen an den Einzelteilen einer Verbindung (z.B.

Positionsänderungen) eine manuelle Überarbeitung der anderen Verbindungselemente erfordert. Durch die fehlende Verknüpfung der Einzelteile zueinander werden solche Probleme meist erst später erkannt, wenn beispielsweise eine statische Kollisionsanalyse des aktuellen Entwicklungsstandes durchgeführt wird.

Aufgrund der großen Zahl der Produktänderungen in den frühen Phasen der Produktentwicklung finden sich daher noch wenige bzw. noch nicht korrekt positionierte Verbindungselemente in den CAD-Daten. Erst mit zunehmendem Reifegrad des Produktes werden auch die Verbindungselemente nach und nach richtig positioniert. Die digitale Absicherung dieser Verbindungen erfordert daher eine Aufbereitung der Produktdaten, bevor diese für Simulationen zur Verfügung stehen. Dazu gehört das Einbringen von Referenzelementen, um Werkzeuge in einer Simulation an einer Verbindung platzieren zu können. Darüber hinaus müssen auch weiterführende Informationen, z.B. Prozessparameter ermittelt werden, um eine realitätsnahe Simulation des Fügevorgangs durchzuführen. Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte zur Vorbereitung und Durchführung einer digitalen Absicherung wird im nachfolgenden Abschnitt gegeben. Exemplarisch wird hier erneut die Absicherung von Schraubverbindungen diskutiert. Die beschriebenen Ansätze bzw. Arbeitsschritte lassen sich jedoch auch auf andere Verbindungsarten übertragen.

### **4.2.3. Digitale Werkzeugabsicherung**

Digitale Werkzeugabsicherungen sind Simulationen, die Montage- bzw. Demontageprozesse untersuchen. Angewendet wird die digitale Werkzeugabsicherung beispielsweise in Workshops zur digitalen Baubarkeit

(siehe Abbildung 4.1). Dabei werden Montage- bzw. Demontageprozesse in einem CAD-System nachgebildet, um potentielle Problemsituationen bei den realen Prozessen zu identifizieren [Mei10,RWPM09]. Die digitale Werkzeugabsicherung steht in dieser Arbeit stellvertretend für die unterschiedlichen Simulationsmethoden, die zur Absicherung von Verbindungspunkten verwendet werden können. Die Durchführung einer digitalen Werkzeugabsicherung erfordert die folgenden Arbeitsschritte:

- Bauraum erstellen
- Simulationsgeometrie erstellen
- Positionierung der Simulationsgeometrie
- Simulation von Bewegungspfaden
- Simulationsauswertung

#### **Bauraum erstellen**

Der Bauraum bildet die Grundlage für eine Simulation und besteht im Wesentlichen aus Einzelteilen und Baugruppen des Produktes und ggf. weiterer Elemente (z.B. Haltevorrichtungen). Diese werden in einer Simulation auch als „Störgeometrie“ bezeichnet, da diese zu Kollisionen mit den verwendeten Werkzeugen führen können und daher eine reibungslose Montage stören.

In den meisten Fällen handelt es sich bei diesen Elementen um statische Elemente. Das bedeutet, sie verändern oder bewegen sich während einer Simulation nicht selbstständig. Den Zustand, in welchem sich ein

Produkt während einer Absicherungsuntersuchung befindet, bezeichnet man als Aufbauzustand. Ein Aufbauzustand ist dadurch gekennzeichnet, dass nur eine bestimmte Menge der Bauteile des Produktes sichtbar ist. Bauteile, die im betrachteten Zustand noch nicht montiert bzw. bereits entfernt wurden, sind entsprechend ausgeblendet. Ein Aufbauzustand kann entweder durch Ein- und Ausblenden von Bauteilen erzeugt werden oder es wird eine Kopie des Produktmodells erzeugt und die entsprechenden Bauteile vor der Simulation entfernt.

### **Simulationsgeometrie erstellen**

Für eine Simulation von Montage- bzw. Demontageprozessen müssen die benötigten Werkzeuggeometrien in digitaler Form vorliegen. In den Fällen, in denen ein Werkzeug aus mehr als einem Einzelteil besteht, muss die Simulationsgeometrie zusammengebaut werden, bevor mit der Simulation begonnen werden kann. Die Einzelteile bzw. unterschiedlichen Werkzeugklassen für Montagewerkzeuge können beispielsweise der ISO 1703 [ISO05] entnommen werden. Basierend auf den hier definierten Klassen können Gesetzmäßigkeiten für das Zusammensetzen von Werkzeugen gebildet werden (siehe Abbildung 4.3). Dadurch lässt sich eine Konfigurationskette bilden, welche durch eindeutige Abhängigkeiten beschrieben wird. Verbindungselemente bilden das erste Element dieser Kette. Ihre Merkmale (Verbindungsart, -größe, etc.) liefern die Kriterien für die Auswahl des ersten Elementes eines Werkzeugs (z.B. Nuss oder Bit). Die nachfolgenden Elemente haben ebenfalls eindeutige Merkmale, welche es lediglich bestimmten anderen Elementen erlauben an diese gefügt zu werden. Beispielsweise lassen sich nur Werkzeugeinzelteile mit den gleichen Zoll-Maßen (z.B.  $\frac{1}{2}$  oder  $\frac{1}{2}$  Zoll) miteinander kombinieren.

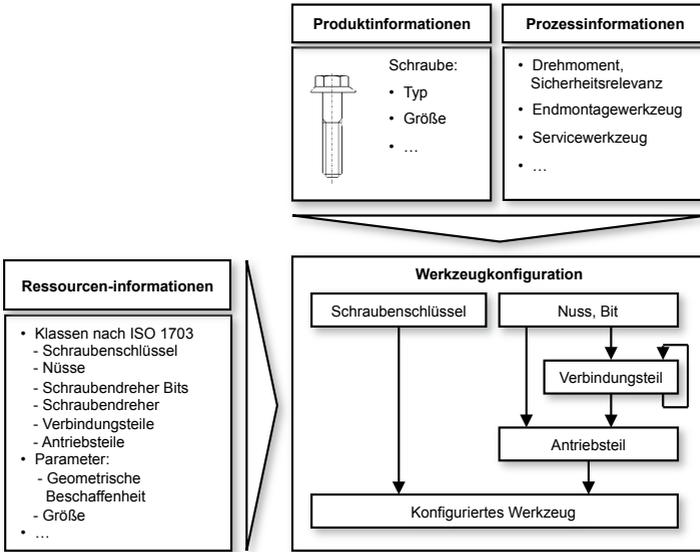


Abbildung 4.3.: Konfiguration von Montagewerkzeugen

Die Elemente haben dabei immer ein An- und eine Abtriebsseite. Die Eigenschaften der Abtriebsseite bestimmen so zu sagen die Eigenschaften der Antriebsseite des nachfolgenden Elementes in der Kette. Eine Konfigurationskette endet entweder, wenn der Benutzer kein weiteres, nachfolgendes Element auswählt oder wenn das letzte Element keine nachfolgenden Elemente mehr zulässt (z.B. Schraubendreher oder ein Antrieb). Insbesondere im zweiten Fall kann dann noch ein Menschmodell mit dem Werkzeug verknüpft werden, da dies die logische Fortführung einer solchen Konfigurationskette darstellt. Abbildung 4.4 verdeutlicht noch einmal den Zusammenbau einer Konfigurationskette, welche bei einer Schraube beginnt und beim Antrieb endet.

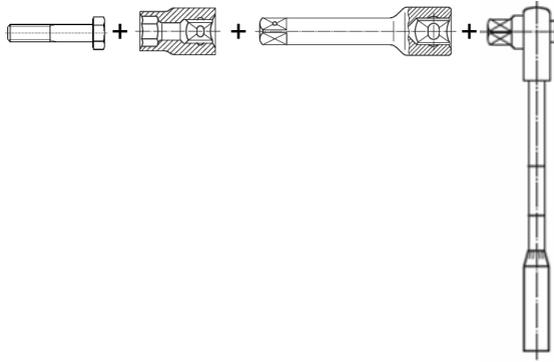


Abbildung 4.4.: Konfigurationskette, gebildet aus Schraube, Nuss, Verlängerung und Antrieb

Um die erzeugte Werkzeugkonfiguration auch als simulierbare Geometrie zu erhalten, werden die Einzelteile durch einen Konfigurator zusammengesetzt und an dem entsprechenden Verbindungselement positioniert. Dafür müssen alle Werkzeuggeometrien mit zusätzlichen Informationen ausgestattet werden. Durch Referenzelemente an allen Bauteilen, lassen sich diese anschließend über einfache Relationen miteinander verknüpfen und korrekt positionieren bzw. ausrichten. Um die korrekte Ausrichtung der Einzelteile zu gewährleisten, werden sowohl an der Antriebs- wie an der Abtriebseite Achsensysteme eingebracht.

### **Positionierung der Simulationsgeometrie**

Zur Positionierung von Werkzeugen in einem Bauraum lassen sich Referenzelemente im Produkt oder an Verbindungen (vgl. Abschnitt 3.3.2 auf Seite 72) wieder verwenden. Die Lage dient dabei als Werkzeug-

gangriffspunkt und die Orientierung zur Ausrichtung des Werkzeugs. Dabei werden die Referenzelemente eines Werkzeugs automatisiert mit den Referenzelementen einer Verbindung in Überdeckung gebracht, so dass das Werkzeug positioniert wird (siehe Abbildung 4.5).

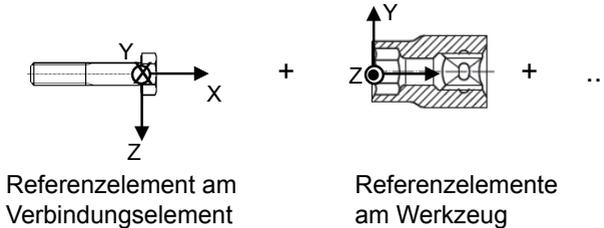


Abbildung 4.5.: Positionierung einer Nuss an einer Schraube mit Hilfe von Referenzelementen

### Simulation von Bewegungspfaden

Als mögliche Bewegungen eines Werkzeugs während einer Simulation stehen Translation und Rotation zur Verfügung. Gerade bei abgewinkelten Werkzeugen kann die Rotation helfen, Positionen zu identifizieren, in welchen das Werkzeug keine Kollisionen mit umliegenden Bauteilen hat. Im Gegensatz dazu liefert die Translation des Werkzeugs entlang der Fügeachse Auskunft darüber, ob das Fügen bei einer Schraubverbindung ohne Kollisionen mit umliegenden Bauteilen durchgeführt werden kann.

## Simulationsauswertung

Die Auswertung der Simulationsergebnisse richtet sich in erster Linie danach, ob es sich um eine manuelle oder um eine automatisierte Simulation handelt. Manuelle Simulationen bieten dem Anwender die Möglichkeit interaktiv mit dem Simulationsmodell zu arbeiten und so unmittelbar eine Rückmeldung zur simulierten Szene zu erhalten. Dies kann beispielsweise durch farbliches Hervorheben von kollidierenden Bauteilen bewirkt werden. Bewegt der Anwender ein Werkzeug in eine Position, in der dieses Kollisionen mit umliegenden Bauteilen verursacht, werden die betroffenen Bauteile hervorgehoben (siehe Abbildung 4.6). Verlässt das Werkzeug diesen Bereich wieder, wird die Hervorhebung wieder rückgängig gemacht.

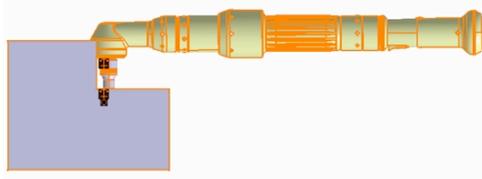


Abbildung 4.6.: Visualisieren von Kollisionen durch Hervorhebung der betroffenen Bauteil- und Werkzeuggeometrie

Für die automatisierte Simulation bietet sich ein Kuchendiagramm als weitere Darstellungsform an. Ein Kuchendiagramm wird beispielsweise dort verwendet, wo ein Werkzeug automatisiert an einer oder mehreren Verbindungen angesetzt und um die Fügeachse rotiert wird. Während dieser Rotation wird das Werkzeug um  $360^\circ$  gedreht und es werden zwei mögliche Zustände erfasst. Gibt es keine Kollisionen zwischen den Werkzeug und umliegenden Bauteilen während der Rotation, werden

alle Winkelgrade grün eingefärbt. Im Gegensatz dazu werden Winkelgrade, in denen es zu Kollisionen kommt rot markiert. Abbildung 4.7 zeigt beispielhaft die Analyse eines Bauteilumfangs mit einem Werkzeug und einem zusätzlichen Handmodell am Griff des Werkzeugs.

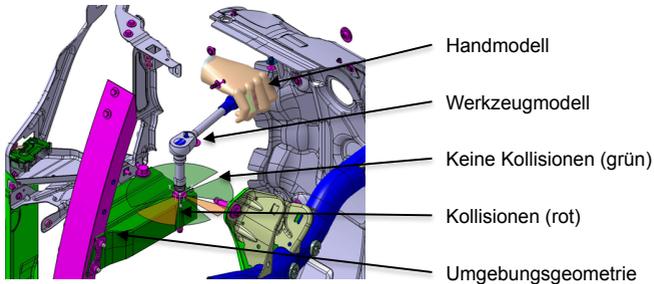


Abbildung 4.7.: Beispiel einer Werkzeugabsicherung mit einem zusätzlichem Handmodell

Je größer die Anzahl der zu untersuchenden Elemente und Optionen, desto unübersichtlicher wird die Darstellung der Ergebnisse mit Hilfe einzelner Kuchendiagrammen. Daher können die Ergebnisse in einer Matrixdarstellung noch weiter verdichtet werden. Eine Matrix stellt die zu untersuchenden Verbindungspunkte den möglichen, vorkonfigurierten Werkzeugen gegenüber (siehe Abbildung 4.8). Während der Simulation werden also alle Werkzeugkonfigurationen an allen Verbindungspunkten simuliert. Dabei lassen sich dann drei mögliche Zustände erfassen: Kollisionsfreie Rotation (grün), keine kollisionsfreie Rotation möglich (rot) und teilweise kollisionsfreie Positionen (gelb). Werden Kombinationen aus Werkzeugen und Verbindungselemente aus der Simulation ausgeschlossen, werden diese nicht simuliert und daher ausgegraut. Diese Art der Darstellung ermöglicht es dem Anwender, relativ schnell zu entscheiden, ob es ein Werkzeug gibt, welches für alle Verbin-

dungen geeignet ist oder ob keines der simulierten Werkzeuge für die vorliegende Montagesituation geeignet ist. In den Fällen, die gelb markiert sind, ist eine detaillierte Betrachtung der Simulation notwendig, um zu entscheiden, ob das entsprechenden Werkzeug an dieser Verbindung eingesetzt werden kann.

	Schraube 1	Schraube 2	Schraube 3	Schraube ...
Werkzeug 1	Keine Kollisionen	Keine kollisionsfreie Position	Nicht untersucht	Nicht untersucht
Werkzeug 2	Keine Kollisionen	Teilweise kollisionsfrei	Nicht untersucht	Nicht untersucht
Werkzeug ...	Nicht untersucht	Nicht untersucht	Teilweise kollisionsfrei	Keine kollisionsfreie Position

Abbildung 4.8.: Zusammenfassung von Simulationsläufen in einer Matrix

### 4.3. Systeme

Wie in Abbildung 2.14 auf Seite 45 dargestellt, kommen entlang des Produktentstehungsprozesses unterschiedliche Applikationen zur Anwendung. Abbildung 4.9 zeigt die wichtigsten Systeme während der Entwicklung und Absicherung von Verbindungen.

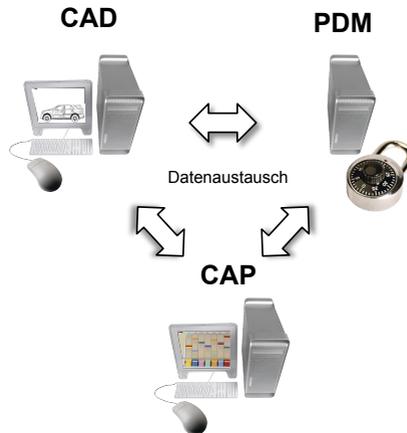


Abbildung 4.9.: Betroffene Systeme bei der Dokumentation und Absicherung von Verbindungen

#### 4.3.1. CAD-System

CAD-Systeme werden zur Erzeugung und Änderung von 3D-Geometrie eingesetzt. Im betrachteten Unternehmen wird CATIA V5 der Firma Dassault Systèmes eingesetzt. CATIA V5 wird nicht ausschließlich für die Konstruktion von Bauteilen des Produktes eingesetzt. Durch die permanente Virtualisierung der Produktions- und Fertigungsabläufe werden auch Betriebsmittel in Form von CAD-Modellen konstruiert und bereitgestellt.

Während der Bauteilkonstruktion erfolgt auch die Erstellung von Verbindungen. Viele Verbindungselemente stehen als Normteile in Katalogen zur Verfügung (z.B. Schrauben, Muttern, Schweißbolzen). Im Fall von Rohbaufügellementen (z.B. Schweißpunkte, Klebenähte) kommen

spezielle Features zur Anwendung. Diese besitzen in der Regel keine eigene Geometrie, verfügen jedoch über Meta-Informationen (z.B. Prozessparameter), die in nachfolgenden Prozessschritten wiederverwendet werden.

Neben den konstruktiven Aspekten unterstützen CAD-Systeme den Konstrukteur auch durch ihre Visualisierungs- und Analysefähigkeiten (vgl. Abschnitt 3.15 auf Seite 83). So wurde beispielsweise die digitale Werkzeugabsicherung (siehe Abschnitte 4.2.3 auf Seite 95) ebenfalls in CATIA V5 implementiert.

#### **4.3.2. PDM-System**

PDM-Systeme dienen als zentraler Ablageort für Geometrieinformationen. Daher sind PDM- und CAD-Systeme in der Regel durch leistungsfähige, bi-direktionale Schnittstellen miteinander gekoppelt. Diese Kopplung sorgt dafür, dass Informationen der Konstruktion unmittelbar im PDM-System gespeichert werden. Umgekehrt ermöglicht die Kopplung auch das Senden von Informationen aus dem PDM-System an das CAD-System, z.B. zur Visualisierung, Geometrieänderung oder Absicherung.

Der Produktdatenaustausch erfolgt immer für bestimmte Produktinformationen. Diese werden nach unterschiedlichen Kriterien (z.B. Baureihe, Reifegrad, Variante) konfiguriert. Über eine Produktkonfiguration wird eingestellt, welche Versionen und Varianten angezeigt werden. Das Ergebnis einer Produktkonfiguration ist beispielsweise ein baubares Fahrzeug. Da es nahezu unmöglich ist, alle Varianten eines Fahrzeugs einzelnen hinsichtlich ihrer Baubarkeit zu untersuchen, werden Referenzfahrzeuge festgelegt. Referenzfahrzeuge werden beispielsweise

aus Minimal-, Maximalkonfigurationen erzeugt. Minimalkonfigurationen stehen für relativ einfache Produktvarianten (z.B. Grundausstattung ohne zusätzliche Ausstattungspakete). Im Gegensatz dazu bilden Maximalkonfigurationen möglichst komplexe Produktvarianten ab, bei denen die größtmögliche Anzahl an Sonderausstattungen eingebaut werden. Dazwischen gibt es noch ein Spektrum weiterer Produktkonfigurationen, die beispielsweise aufgrund der Erfahrung aus vergangenen Produktprojekten immer wieder zu Problemen geführt haben.

Aufgrund der stark verteilten Entwicklung von Produkten durch Mitarbeiter innerhalb (z.B. Fachbereiche) und außerhalb des Unternehmens (z.B. Zulieferer) wird der Zugriff auf die gespeicherten Produktinformationen durch ein eigenes Rechtemanagement gesichert. Dieses stellt sicher, dass Anwender nur die Daten sehen bzw. bearbeiten dürfen, auf denen sie entsprechende Berechtigungen haben.

PDM-Systeme sind in der Lage viele Informationen in unterschiedlichen Formaten zu archivieren. Die Menge der benötigten Geometrieinformationen (mehrere Gigabyte), die eine Fahrzeug vollständig darstellen, sowie die große Anzahl der durchgeführten Untersuchungen erlauben es nicht, direkt auf einem PDM-System zu Arbeiten. Daher werden die Daten heruntergeladen und auf einem abgesicherten Dateisystem bereitgestellt. Wie in Abbildung 4.10 dargestellt, greifen die unterschiedlichen Fachdisziplinen, wie Berechnung oder Simulation auf diese Daten zu und erzeugen ggf. eigene Kopien dieser Daten, beispielsweise wenn noch weitere Aufbereitungsschritte notwendig sind. In vielen Fällen handelt es sich bei dieser Art der Datenversorgung ausschließlich um einen Einweg-Datenversorgung, da nicht vorgesehen ist, dass die einzelnen Fachbereiche ihre Daten wieder an das PDM-System zurück speichern.

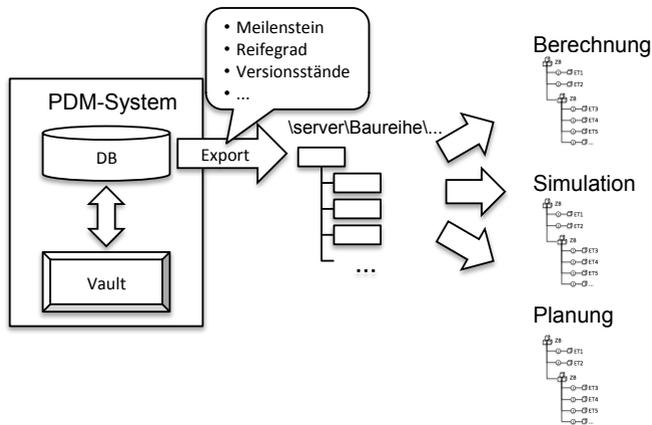


Abbildung 4.10.: Bereitstellung von Daten für die unterschiedlichen Disziplinen

Ein weiterer, wichtiger Punkt ist die Verwendung von Ersatzformaten. Da nicht jede Simulationsanwendung native CAD-Geometriedaten mit allen Detailinformationen benötigt, werden diese Daten in andere Formate (z.B.  $.jt^2$  oder  $.cgr^3$ ) übersetzt. Ersatzformate bieten den Vorteil, dass sie weniger Speichervolumen beanspruchen und daher zu Performanceverbesserung bei der Visualisierung führen.

<sup>2</sup>Jupiter Tessellation - Siemens-Datenformat, welches für Datenaustausch, Kollaboration und Visualisierung verwendet wird.

<sup>3</sup>CATIA Graphical Representation - Datenformat der Firma Dassault Systèmes, welches aus nativen CATIA-Daten erzeugt werden kann und für Visualisierungszwecke verwendet wird, wenn keine Konstruktion durchgeführt wird oder hohe Datenmengen visualisiert werden sollen.

### 4.3.3. CAP-System

Analog zum Einsatz von CAD-Systemen in der Konstruktion werden zur Planung von Produktionsanlagen etc. CAP-Systeme (Computer Aided Planning) eingesetzt. Diese unterstützen den Planer bei der Generierung von Montage- oder Demontagesequenzen. Hierfür werden die vorhandenen Produktinformationen mit Prozess- und Ressourcinformationen verknüpft. Diese Informationen werden wiederum in der digitalen Absicherung benötigt, um das Zusammenspiel von Produkt, Prozess und Ressource zu überprüfen.

Applikationen für diesen Einsatzzweck sind beispielsweise Delmia V5 der Firma Dassault Systèmes oder Tecnomatix der Firma Siemens PLM. Der Einsatz dieser Softwarewerkzeuge ermöglicht es, in einem frühen Stadium der Produktentstehung Fertigungsprozesse zu modellieren. Durch die Verknüpfung von Prozess- und Geometrieinformationen lassen sich die Fertigungsprozesse anschließend auch simulieren und diverse „was-wäre-wenn-Szenarien“ durchspielen, ohne dass kostspielige Hardware beschafft werden muss.

## 4.4. Informationen

Die Simulation von Montage- bzw. Demontagevorgängen fester Verbindungen erfordert die Zusammenführung der notwendigen Informationen des Produktes, der relevanten Prozesse und der benötigten Ressourcen. Diese Informationen liegen meist verteilt in unterschiedlichen Anwendungen bzw. Datenbanken. Zur Durchführung von kontextorientierten Absicherungen werden die folgenden Daten bzw. Informationsarten benötigt.

- Verbindungsinformationen
- Produktdaten
- Aufbauzustand des Produktes
- Zusätzliche Störgeometrien
- Kontext
- Werkzeuginformationen

### **Verbindungsinformationen**

Verbindungsinformationen bilden die Grundlage digitaler Absicherungen von Werkzeugen. Die Verbindungsart stellt dabei das grundlegende Filterkriterium zur Auswahl eines passenden Montagewerkzeugs dar. Während also eine Schweiß- oder Klebeverbindung mit einer Schweißzange oder einer Klebepistole realisiert wird, werden für Fügevorgänge mit Schrauben andere Montagewerkzeuge benötigt. Diese Unterteilung kann als eine Art Klasse verstanden werden und dient der ersten Filterung der benötigten Werkzeugdaten.

Darüber hinaus dienen verbindungsspezifische Merkmale zur weiteren Einschränkung innerhalb einer Klasse. Gerade bei Schrauben existiert eine große Vielfalt unterschiedlicher Formen (z.B. Inbus, Außen-, Innensechskant, Außen-, Innentorx, etc.). Jede dieser Formen benötigt entsprechende Werkzeugaufsätze (z.B. Nuss oder Bit). Gleichzeitig treten diese Kopfformen auch noch in unterschiedlichen Größen auf. All diese Informationen werden benötigt, um später den richtigen Aufsatz zu ermitteln. Zur vollständigen Unterstützung der Absicherung werden

schließlich noch die Referenzelemente benötigt, welche an jeder Verbindung vorhanden sind. Diese dienen während einer Simulation als Angriffspunkt für Werkzeuggeometrien.

### **Produktdaten**

Für den Aufbau von Simulationsmodellen werden Geometrische Informationen des Produktes benötigt. Produktdaten durchlaufen während der Produktentstehung unterschiedliche Reifegrade. Diese werden im PDM-System üblicherweise mit einem Status belegt.

Im betrachteten Unternehmen sind dies konkret:

- Working: Daten, an denen aktiv gearbeitet wird und die nicht direkt in Folgeprozessen verwendet werden sollten.
- Engineering: Daten, mit einem höheren Reifegrad als Daten im Zustand „Working“, die prinzipiell über einen Freigabeworkflow in den Zustand „Released“ überführt werden können.
- Released: Daten, die bereits einen Freigabeprozess durchlaufen haben. Dieser umfasst beispielsweise die Überprüfung auf formale Richtigkeit der technischen Zeichnung und eine Bewertung des Bauteils im Zusammenbau eines konkreten Produktes.

Wird ein Bauteil aktiv konstruiert, handelt es sich üblicherweise um „Working Daten“. Änderungen an diesen Bauteilen überschreiben vorherige Versionsstände, so dass diese Daten keine verlässliche Basis für eine Simulation darstellen. Weisen die Produktdaten einen bestimmten Reifegrad auf, können diese, abhängig vom Entwicklungsprozess, auf „Engineering“ gesetzt werden. Damit ist auch eine Qualitätsprüfung

der CAD-Modelle verbunden. Versionsstände im Status Engineering können jederzeit wieder reproduziert werden. Daten im Status „Released“ bilden schließlich den höchsten Reifegrad, da diese prinzipiell auch bestellt und produziert werden können. Sowohl Engineering- als auch Released-Daten lassen sich in PDM-Systemen jederzeit reproduzierbar aufrufen, weshalb diese Daten verlässliche Eingangsinformationen für die Erstellung von Simulationsmodellen darstellen.

Für eine Simulation können Produktdaten entweder im nativen Datenformat des verwendeten CAD-Systems oder aber in einem Ersatzformat zur Verfügung gestellt werden. Ersatzformate dienen lediglich der Darstellung der Geometrien, enthalten eine geringere Menge an Informationen und können nicht konstruktiv verändert werden. Doch gerade durch die Reduktion der enthaltenen Informationen eignen sich Ersatzformate besonders für die Visualisierung großer Baugruppen mit vielen Einzelteilen, da diese schneller geladen werden.

### **Aufbauzustand des Produktes**

Abhängig von der vorliegenden Aufgabenstellung befasst sich eine Absicherung entweder mit einer Montage- oder Demontagesituation. Das vorliegende Produktmodell ist im entsprechenden Aufbauzustand darzustellen. Dazu muss zunächst die Montage- bzw. Demontagerihenfolge des Produktes bekannt sein. Die Montagerihenfolge wird während der Montageplanung erstellt und gepflegt und kann den entsprechenden Systemen entnommen werden. Die Demontagerihenfolge entsteht zum Beispiel in den Bereichen, die sich mit dem After-Sales, also mit den Prozessen nach der Herstellung des Produktes befassen.

### **Zusätzliche Störgeometrien**

Ein Simulationsmodell ist eine Nachbildung realer (zukünftiger) Sachverhalte. Dieses orientiert sich daher so weit wie möglich an realen Situationen. Gerade für die Simulation von Montageprozessen können weitere Störgeometrien in einem Bauraum vorhanden sein. Bei schweren Bauteilen können diese zum Beispiel Handhabungsvorrichtungen für den leichteren Transport von Bauteilen oder Baugruppen sein. Jede zusätzliche Geometrie muss demnach auch bei einer Simulation im Modell vorhanden sein, da diese weitere Randbedingungen darstellen, denen ein Produkt bzw. ein Werkzeug gerecht werden muss. Als zusätzliche Störgeometrie, welche in einem vorgegebenen Bauraum Platz finden muss, kann auch die Hand eines Monteurs oder ein komplettes Menschmodell in einer Simulation vorhanden sein. Insbesondere bei der Betrachtung von Service- und Reparaturarbeiten an einem Fahrzeug werden viele Situationen betrachtet, in denen ein Werkzeug und die Hand des Bedieners nur knapp in einen vorhandenen Bauraum passen.

### **Kontext**

Zur Durchführung einer Absicherung muss zunächst geklärt werden, welche Ziele mit einer Absicherung verfolgt werden. Wie in Kapitel 2 auf Seite 15 beschrieben, kann eine Simulation entweder dazu dienen, ein geeignetes Montage-/Demontagesystem für ein vorliegendes Produkt zu finden oder aber ein Produkt dahingehend zu entwickeln, dass es mit einem vorhandenen Montage-/Demontagesystem zusammenarbeiten kann. In beiden Fällen muss das Ziel der Simulation vorab bekannt sein.

## **Werkzeuginformationen**

Die Konfiguration von Werkzeugen für Simulationen erfolgt durch eine Konfigurationsanwendung. Diese Anwendung wurde entwickelt, um ausgehend von einem Verbindungselement sinnvolle Werkzeuge aufbauen zu können. Die Werkzeugeinzelteile werden dabei in einem Katalog gespeichert, so dass diese zentral im Unternehmen zur Verfügung stehen. Der Konstrukteur kann nun durch den Katalog gehen und sich die benötigten Einzelteile zusammen konfigurieren. Durch die Charakteristiken der An- und Abtriebsseiten der Werkzeuge werden immer nur passende Vorschläge unterbreitet. Ist eine Konfiguration vollständig bestimmt, wird das Werkzeug automatisiert zusammengebaut und kann an dem entsprechenden Verbindungselement positioniert werden.

## **4.5. Fazit**

Die Entwicklung und Absicherung von Verbindungen erfolgt im Rahmen eines standardisierten Produktentstehungsprozesses. Dabei sind die unterschiedlichen Tätigkeiten auf verschiedene Fachbereiche und Disziplinen aufgeteilt. Ein Abgleich der aktuellen Entwicklungsstände der unterschiedlichen Bauteile erfolgt zu definierten Meilensteinen des Entwicklungsprojekts.

Die Dokumentation von Verbindungen innerhalb dieses Prozesses erfolgt nach unterschiedlichen Gesichtspunkten. Einerseits gibt es Verbindungen im Bereich des Karosserierohbaus (feste, nicht-lösbare Verbindungen). Andererseits gibt es Montageverbindungen (feste, lösbare Verbindungen). Diese Verbindungsarten unterscheiden sich in der Regel darin, ob diese durch eine Ersatzgeometrie (z.B. Referenzelemente)

oder durch 3D-Geometrien repräsentiert werden. Zu den Meilensteinen während des Produktentstehungsprozesses wird sowohl die Qualität der aktuellen Produktdaten sowie die Qualität der geplanten Montage- bzw. Demontageprozesse analysiert. Dazu muss das Produkt im Kontext der unterschiedlichen Lebensphasen betrachtet werden.

Die notwendigen Informationen zur Durchführung digitaler Absicherungsuntersuchungen sind über mehrere Systeme verteilt. Im Rahmen dieser Arbeit spielen insbesondere CAD-, PDM- und CAP-Systeme eine wichtige Rolle. Mit Hilfe dieser Systeme lassen sich notwendige Informationen erstellen, archivieren und bedarfsorientiert verteilen.

## 5. Defizite und Handlungsfelder

Ausgehend von der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Situation fasst dieses Kapitel die daraus abgeleiteten Defizite zusammen und erschließt die Handlungsfelder dieser Arbeit.

### 5.1. Dokumentation von festen Verbindungen

Sowohl im betrachteten Produktentstehungsprozess, als auch in den aktuellen Softwaresystemen werden feste Verbindungen unterschiedlich behandelt. Das führt nicht nur zu einer Erhöhung der Komplexität der IT-Landschaft, sondern auch zu komplexeren Prozessen in der Produktentwicklung, da jede Verbindungsart anders behandelt wird. Um die Qualität der vorhandenen Produktdaten zu erhöhen, ist es notwendig Verbindungsinformationen in einer einheitlichen Art und Weise zu erfassen und nachfolgenden Prozessschritten zur Verfügung zu stellen. Jede Verbindung besteht sowohl aus geometrischen als auch aus nicht-geometrischen Informationen. Feste lösbare Verbindungen, wie etwa Schraubverbindungen, sind durch geometrische Elemente im CAD-Modell vollständig repräsentiert. Dennoch fehlt CAD-Modellen ein umfassendes Verständnis für die Verbindung selbst. Um eine Verbindung vollständig zu charakterisieren, ist daher die Verknüpfung der geometrischen Elementen mit zusätzlichen Meta-Informationen der Verbindung notwendig. Diese Charakterisierung ist beispielsweise notwendig,

um während der digitalen Absicherung die richtigen Entscheidungen treffen zu können. Beispielsweise existieren zwingende Abhängigkeiten zwischen der Verbindungsart und den einsetzbaren Werkzeugtypen.

Einen weiteren Aspekt bei der Dokumentation von Verbindungen stellen die unterschiedlichen Lebensphasen des Produktes dar. Heutige Dokumentationsmethoden fokussieren sich sehr stark auf die Produktionsbelange, d.h. auf die Serienfertigung des Produktes. Ein Produkt durchläuft im Laufe seines Lebens jedoch viele unterschiedliche Phasen, in welchen auch die vorhandenen Verbindungen ganz unterschiedliche Rollen spielen können. Daher müssen auch Informationen aus anderen Lebensphasen bei der Dokumentation von Verbindungen berücksichtigt werden.

Die Verlagerung von Absicherungsaktivitäten in die digitale Lebensphase des Produktes stellt hohe Anforderungen an die zugrunde liegenden Informationen. Im Fall von festen Verbindungen bedeutet das beispielsweise, dass alle geometrischen Elemente einer Verbindung korrekt positioniert sein müssen. Daneben kann die Erstellung von Simulationsmodellen auch durch vorhandene Referenzelemente erheblich beschleunigt werden. Entsprechen diese der korrekten Lage und Ausrichtung der Verbindung, lassen sich Werkzeuge schneller positionieren und simulieren. Daher muss die Erzeugung von Verbindungen auch dahingehend erweitert werden, dass simulationsfähige Modelle erstellt werden können. Damit lässt sich nicht nur die Effizienz von Simulationen erhöhen, sondern auch eine breitere Analyse der vorhandenen Produktdaten bewerkstelligen, als das heute der Fall ist.

Aufgrund des hohen Variantenreichtums heutiger Produkte, muss ein Ansatz zur Dokumentation von Verbindungen auch den existierenden Möglichkeiten der Produktkonfiguration gerecht werden. Dokumenta-

tionsansätze, die Verbindungsinformationen auf Ebene der Einzelteile oder des Zusammenbaus dokumentieren stoßen dabei leicht an ihre Grenzen. Daher besteht ein weiteres Ziel dieser Arbeit auch in der Unterstützung der vorgegebenen Produktvarianz. Nur so lässt sich das vorhandene Variantenspektrum sinnvoll beherrschen und absichern.

## 5.2. Erhöhung der Datenqualität

Vor dem Hintergrund der steigenden Anzahl der digitalen Absicherungsuntersuchungen im Produktentstehungsprozess kann eine Dokumentation von Verbindungen nicht nur auf die Verknüpfung geometrischer und prozessualer Informationen abzielen. Es muss auch eine Möglichkeit geschaffen werden, wie diese Informationen in Simulationen genutzt werden können.

Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist zunächst, dass alle Bauteilgeometrien lagerichtig im Produkt verbaut sind. Erst dadurch kann sichergestellt werden, dass die daraus abgeleiteten Simulationsmodelle der Realität entsprechen. Damit werden auch erhöhte Anforderungen an die Positionierung von Verbindungshilfsmitteln gestellt. Sind diese nicht korrekt positioniert, muss das digitale Modell entsprechend aufbereitet werden, bevor mit einer Simulation begonnen werden kann.

Die Qualität der vorhandenen Produktdaten hat eine zentrale Bedeutung bei der kontextorientierten Absicherung von Produkt und x-System/-en. Dazu zählen sowohl die Informationen des Produktes als auch die Daten der zu untersuchenden x-Systeme. Die Dokumentation von Verbindungen muss daher sicherstellen, dass alle relevanten Informationen während der Produktentwicklung zur Verfügung stehen, um die-

se im Kontext der unterschiedlichen x-Systeme absichern zu können. Abhängig vom Kontext stehen dem Konstrukteur dabei unterschiedliche Freiheitsgrade zur Lösung von Konflikten zur Verfügung. Diese Freiheitsgrade bieten dem Konstrukteur Variationsmöglichkeiten, die bereits während der Simulation genutzt werden können.

Verbindungen stellen die Elemente in einer Produktstruktur dar, an denen all diese Informationen zusammenfließen. Daher bietet sich die Verbindung als Dreh- und Angelpunkt für die Dokumentation dieser Informationen an. Für jeden Kontext stehen unterschiedliche Informationen zur Verfügung. Diese Informationen werden heute in unterschiedlichen Systemen gepflegt. Daher ist es schwierig und zeitaufwändig, alle notwendigen Informationen eines bestimmten Kontextes aufzubereiten und zur Erstellung eines Simulationsmodells zur Verfügung zu stellen.

### **5.3. Unterstützung der kontextorientierten, digitalen Absicherung**

Während der Produktentstehung wird ein Produkt im Kontext unterschiedlicher Lebensphasen betrachtet und bewertet. Das Ziel einer kontextorientierten Produktentwicklung besteht darin, möglichst viele Aspekte der unterschiedlichen Lebensphasen eines Produktes optimal abzubilden und zu unterstützen. Bezogen auf den Entwicklungsprozess lassen sich daraus unterschiedliche Fragestellungen für die Absicherung von Verbindungen ableiten. Handelt es sich um eine produktorientierte Absicherung des x-Systems, so kann das x-System während der Absicherung noch verändert werden. Handelt es sich hingegen um eine x-orientierte Absicherung des Produktes, wird das x-System als gegeben angenommen und das Produkt kann verändert werden. Je nach

Kontext und Aufgabenstellung können auch beide Spielarten in Kombination auftreten. Die Durchführung von digitalen Absicherungen erfordert eine umfangreiche Vorbereitung der Simulationsmodelle. Dazu gehört die Auswahl der relevanten Produktdaten. Das beinhaltet die Auswahl einer passenden Produktkonfiguration, Definition des Aufbauzustandes (Montage- bzw. Demontagerihenfolge) und die Kenntnis des x-Systems, gegen welches eine Analyse stattfinden soll. Die Dokumentation von Verbindungen kann hier unterstützen, indem die vorliegenden Informationen bereits viele der benötigten Informationen zur Durchführung einer Simulation beinhalten (z.B. Referenzelemente).

In den frühen Phasen der Produktentwicklung werden Verbindungen zunächst nach gegebenen Lastfällen ausgelegt und dimensioniert. Hinzu kommt die Fragestellung, ob eine Verbindung später lösbar oder nicht-lösbar sein soll. Handelt es sich um eine lösbare Verbindung, werden sowohl Montage- als auch Demontagefälle geprüft. Diese Fälle ergeben sich beispielsweise aus dem Prototypenbau, der Serienproduktion oder den späteren Service- und Reparaturfällen bzw. dem Recycling. In jedem dieser Anwendungsfälle wird eine reibungslose Montage bzw. Demontage der vorhandenen Verbindungen gefordert. Handelt es sich hingegen um eine nicht-lösbare Verbindung, sind vorrangig Fügeprozesse abzusichern.

Um solche Untersuchungen möglichst nahtlos in den Entwicklungsprozess zu integrieren und durchzuführen, ist eine entsprechende Aufbereitung der Produktdaten notwendig. Abhängig von der vorhandenen Qualität der Produktdaten kann dies einen mehr oder weniger großen Aufwand verursachen. Zunächst einmal muss identifiziert werden, an welchen Positionen im Fahrzeug Verbindungshilfsmittel verbaut werden und welche Merkmale diese aufweisen (Verbindungsart, Größe des

Verbindungshilfsmittels, etc.). Anschließend kann anhand der Merkmale des Verbindungshilfsmittels ein entsprechendes Fügwerkzeug ausgewählt und der Fügeprozess simuliert werden.

Fügwerkzeuge bestehen unter Umständen aus mehreren Einzelteilen. Die gewählten Elemente zum Aufbau des Werkzeugs entscheiden oftmals, ob eine kollisionsfreie Montage oder Demontage einer Verbindung möglich ist oder nicht. Im Vergleich zur eigentlichen Simulation nimmt die Erstellung unterschiedlicher Werkzeugkonfigurationen und die Vorbereitung der entsprechenden Bauräume (Szenen) eine hohe Vorbereitungszeit in Anspruch. Hier müssen Hilfsmittel zur Verfügung gestellt werden, um die Erstellung von Werkzeugkonfigurationen zu beschleunigen und somit die Effizienz der Simulationen zu erhöhen. Durch die bedarfsgerechte Erstellung von Werkzeugen und deren Simulation kann eine kontextorientierte Produktentwicklung frühzeitig die verschiedenen Kontexte, welche sich aus den unterschiedlichen Lebensphasen des Produktes ergeben, absichern. Dies führt einerseits zu einer deutlichen Reduktion der Kosten für Montage- und Demontageumfänge in späteren Lebensphasen und hilft andererseits nachträgliche Produktänderungen zu vermeiden. Bisher werden die Simulationsmodelle für einzelne Absicherungen aufgebaut und müssen bei einer Aktualisierung der Produktdaten erneut aufbereitet werden. Dieser Vorgang ist sehr zeitaufwändig. Die Wiederverwendbarkeit von Simulationsmodellen reduziert den Aufwand für erneute Validierung des Produktes, nachdem eine Veränderung vorgenommen wurde. Daher soll die Zeit zur Erstellung von Simulationsmodellen reduziert werden, so dass mehr Zeit für die Variation und Interpretation von Simulationen zur Verfügung steht.

## 5.4. Datenbereitstellung im Produktentstehungsprozess

Absicherungen erfolgen in unterschiedlichen Fachbereichen. Diese Fachbereiche oder Fachdisziplinen stehen für die unterschiedlichen Lebensphasen, die ein Produkt während seines Lebens durchläuft. Innerhalb der Produktstruktur und den zur Verfügung stehenden Informationen werden diese Informationen nicht hinterlegt. In der Regel werden die Produktdaten in jedem Fachbereich erneut aufbereitet, um sie den eigenen Absicherungsmethoden zur Verfügung zu stellen. Auch hier soll eine vereinheitlichte Dokumentation und Absicherung von Verbindungen Synergien erschließen.

Der Einsatz unterschiedlicher Softwaresysteme zur Dokumentation und Absicherung von Verbindungen führt zu einer zunehmenden Komplexität der IT-Systemlandschaft. Die Bereitstellung von Informationen im Gesamtprozess erfordert daher immer neue Schnittstellen, die auch nicht immer gewährleisten, dass eine verlustfreie Datenübertragung erfolgt. Daher wird ein neuer Ansatz zur Dokumentation und Absicherung von Verbindungen sich auch an seiner Fähigkeit der Datenbereitstellung messen lassen müssen.

## 5.5. Fazit

Die verbesserte Dokumentation von Verbindungen wird im Rahmen dieser Arbeit als primäres Ziel angestrebt, um die Qualität der Produktdaten nachhaltig zu erhöhen. Diese hohe Datenqualität ist der Schlüssel zum durchgängigen und konsequenten Einsatz von digitalen Absicherungsuntersuchungen im Produktentstehungsprozess.

Der Einsatz digitaler Absicherungsuntersuchungen ist dabei nicht auf einzelne Aspekte des Produktlebens beschränkt. Der Fokus heutiger Absicherungsuntersuchungen liegt zu einem hohen Teil auf den unmittelbar auf die Entwicklung folgenden Produktionsprozessen. Prinzipiell lassen sich über die vorhandenen Methoden aber alle Lebensphasen des Produktes betrachten.

## 6. Konzeption

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der durchgängigen, digitalen Absicherung von Verbindungen, bezogen auf die unterschiedlichen Lebensphasen des Produktes. Damit verbunden ist eine verbesserte Dokumentation und Wiederverwendung von Verbindungsinformationen, um Absicherungsuntersuchungen im Produktentstehungsprozess besser zu unterstützen. Grundlage für die Dokumentation wiederum ist eine entsprechend hohe Qualität der vorliegenden Produktdaten, insbesondere der vollständigen und korrekten Positionierung aller Verbindungspartner und -hilfsmittel. Dabei werden im Rahmen der Konzeption die folgenden Themen betrachtet:

- Frühzeitige Dokumentation von Verbindungsinformationen
- Verbesserte Dokumentation von festen Verbindungen
- Unterstützung der digitalen Werkzeugabsicherung für feste Verbindungen
- Berücksichtigung der unterschiedlichen Lebensphasen

### **Frühzeitige Dokumentation von Verbindungsinformationen**

Im Vergleich zu anderen Bauteilen, werden Verbindungen im heutigen Produktentstehungsprozess weniger stark beachtet. Dies trifft insbesondere auf zusätzliche Verbindungshilfsmittel sowie auf die Doku-

mentation von Verbindungen an sich zu, weshalb viele Informationen überhaupt nicht, unvollständig oder erst sehr spät festgelegt und dokumentiert werden. Dabei werden Verbindungskonzepte und Verbindungsarten bereits in der Konzeptphase der Produktentwicklung definiert. Dementsprechend schwierig gestaltet sich die Verwendung dieser Informationen in digitalen Absicherungsuntersuchungen, wodurch der Aufwand für die Datenaufbereitung bzw. Durchführung von digitalen Absicherungen relativ groß ist.

Durch die konsequente Verlagerung von Absicherungsuntersuchungen in die digitale Phase des Produktes werden auch höhere Anforderungen an die Qualität der vorliegenden Produktdaten gestellt. Das nachfolgende Konzept soll diese Lücke schließen, indem Verbindungsinformationen bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung definiert und im Produktdatenmodell archiviert werden. Viele Informationen über Verbindungen und die zu verbindenden Bauteile können auch ohne fertig detaillierte Bauteilgeometrie dokumentiert werden. Im Laufe der Produktentwicklung werden diese Informationen mit weiteren Informationen angereichert, so dass am Ende der Produktentwicklung eine vollständige Beschreibung fester Verbindungen in digitaler Form vorliegt.

### **Verbesserte Dokumentation von festen Verbindungen**

Überall dort, wo ein Produkt aus herstellungs- oder wartungstechnischen Gründen in einzelne Komponenten gegliedert wird, kommen feste Verbindungen zum Einsatz. Je nach Einsatzzweck und Kontext werden Verbindungen in den unterschiedlichen Lebensphasen unterschiedlich behandelt. Bisher werden die Informationen über diese Unterschiede nur teilweise oder gar nicht erfasst, weshalb diese Informationen nicht oder nur unzureichend während digitalen Absicherungen genutzt wer-

---

den können. Hinzu kommt, dass feste Verbindungen, abhängig von der Verbindungsart, im Produktentstehungsprozess auf unterschiedliche Art und Weise gehandhabt werden. Das nachfolgende Konzept betrachtet daher feste Verbindungen als eigenständige Informationseinheit, welche geometrische und nicht-geometrische Informationen miteinander verknüpft. Diese Informationen bilden die Grundlage für die digitale Absicherung und unterstützen damit das langfristige Ziel, so viele Absicherungsaktivitäten wie möglich in die digitale Lebensphase des Produktes zu überführen. Ebenso hebt dieses Konzept die unterschiedliche Handhabung von lösbaren und nicht-lösbaren Verbindungen auf, die in der heutigen Praxis existiert. Daher setzt diese Arbeit auf eine Vereinheitlichung in der Dokumentation, welche prinzipiell auch auf andere Verbindungsarten übertragen werden kann.

### **Unterstützung der digitalen Werkzeugabsicherung für feste Verbindungen**

Digitale Werkzeugabsicherungen spielen eine wichtige Rolle im Produktentstehungsprozess. Diese Absicherungen zielen darauf ab, frühzeitig das Zusammenspiel von Merkmalen des Produktes und Merkmalen der unterschiedlichen x-Systeme (Montage- bzw. Demontagesysteme) zu simulieren. Dabei werden Probleme möglichst noch in der digitalen Lebensphase des Produktes erkannt und behoben. Die digitale Absicherung von Werkzeugen erfordert besondere Informationen, um das Datenmodell des Produktes mit dem Produktdatenmodell eines Werkzeugs zu verknüpfen. Bisher erfolgte diese Verknüpfung der beiden Modelle mit einem hohen manuellen Aufwand. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept vorgestellt, welches beide Datenmodelle entsprechend mit Informationen anreichert, so dass digitale Absicherungen jederzeit wiederholt und variiert werden können, ohne dass die Datenmodelle aufwändig überarbeitet werden müssen.

### **Berücksichtigung der unterschiedlichen Lebensphasen**

Bisher finden sich in den Produktdaten nur wenig Informationen über die unterschiedlichen Lebensphasen die ein Produkt durchläuft. Der Fokus in der Produktentwicklung liegt bisher primär auf funktionalen Aspekten und einer reibungslosen Serienproduktion. Die Betrachtung weiterer Produktlebensphasen findet meist in anderen Systemen oder Fachbereichen statt, weshalb die Produktdaten häufig in andere Applikationen versorgt werden. Dadurch fehlt ein zusammenhängendes Verständnis für das Produkt.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit besteht deshalb darin, diese Informationen in einem Datenmodell zu bündeln und ein gesamtheitliches Verständnis über die Anforderungen aus den unterschiedlichen Lebensphasen zu erhalten. Dabei wird zwischen allgemeinen und kontextabhängigen Verbindungsinformationen unterschieden. Dies reduziert nicht nur die Anzahl der möglichen Informationsbrüche, wenn die Informationen über mehrere Systeme hinweg ausgetauscht und gepflegt werden, sondern bietet dem Anwender auch einen konsistenten Informationsstand über das Produkt.

### **6.1. Positionierung von Verbindungshilfsmitteln**

Da ein Produkt in den frühen Phasen der Produktentwicklung permanenten Änderungen unterworfen ist, werden Verbindungselemente erst relativ spät im Prozess korrekt positioniert. Voraussetzung für die digitale Absicherung ist jedoch die korrekte Positionierung aller Bauteile und der entsprechenden Verbindungshilfsmittel. Daher wird hier ein Konzept vorgestellt, mit welchem Verbindungshilfsmittel schneller positioniert werden können. Dieses Verfahren ist sowohl für die Erst- als

auch für die Änderungspositionierung anwendbar. Besondere Vorteile hat diese Methode, wenn mehrere Verbindungselementen mit gleichen Merkmalen positioniert werden sollen.

### 6.1.1. Vorpositionierung

Die schnelle Positionierung von Bauteilen in einer 3D-Szene befasst sich mit dem ersten Schritt der Bauteilpositionierung, der groben Vorpositionierung. Wie in Abschnitt 4.2.1 auf Seite 92 dargestellt, sind für die Positionierung von Bauteilen mehrere Schritte erforderlich. Mit Hilfe des hier entwickelten Algorithmus können diese Schritte auf eine einzige Benutzerinteraktion reduziert werden.

Dazu wird eine Eigenschaft des CAD-Systems - das Blickzentrum - verwendet. Wie in Abbildung 6.1 dargestellt, ermittelt das CAD-System ein Blickzentrum, welches sich auf der Sichtachse des Benutzers befindet und in Koordinaten ausgedrückt werden kann. Bewegt der Benutzer ein bestimmtes Objekt in den sichtbaren Bereich seiner 3D-Szene, so können die Koordinaten dieses Blickzentrum ausgelesen und auf die lagebestimmende Transformationsmatrix anderer Objekte übertragen werden. Dieser Ansatz wurde in Form einer eigenen Funktion im existierenden CAD-System implementiert. Wird die Funktion gestartet, ermittelt das CAD-System das aktuelle Blickzentrum. Selektiert der Benutzer nun ein Bauteil im Strukturbaum oder in der CAD-Szene, werden die Positionsinformationen des Blickzentrums auf die Transformationsmatrix des Bauteils geschrieben, so dass dieses anschließend im Blickzentrum erscheint. Somit muss ein Bauteil nicht über mehrere Positionierschritte durch den 3D-Raum bewegt werden. Es genügt, wenn eine Zielposition (z.B. ein Bauteil im Heckwagen) zentral am Monitor

zu sehen ist. Wird anschließend die Funktion aufgerufen und ein anderes Bauteil im Strukturbaum selektiert, wird dieses im Blickzentrum der Szene positioniert.

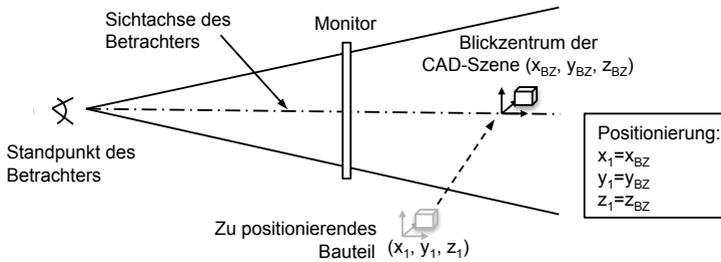


Abbildung 6.1.: Grobe Vorpositionierung von Bauteilen in einer 3D-Szene

### 6.1.2. Feinpositionierung

Bauteilen und Baugruppen einer Produktstruktur werden über eine Transformationsmatrix eine Position im Raum zugeordnet. Die angewendeten Transformationen werden entweder relativ zu anderen Bauteilen berechnet (z.B. Bauteilposition innerhalb einer Baugruppe) oder absolut zum globalen Koordinatensystem des Produktes.

Zur Positionierung von Verbindungshilfsmitteln an Bohrungen lassen sich bestimmte Merkmale dieser Bauteile nutzen. Wie in Abbildung 6.2 dargestellt, verfügen Bohrungen, Schrauben, Bolzen usw. an der Verbindungsstelle über eine Längsachse und eine Auflagefläche. Die Längsachse entspricht der Fügeachse des Verbindungshilfsmittels. Die Auflagefläche, an der sich die einzelnen Verbindungspartner berühren, wird durch eine Ebene im Raum beschrieben. Der Schnittpunkt von

Fügevektor und Ebene wird als Einfügepunkt definiert. Dieser dient, zusammen mit dem Richtungsvektor der Fügeachse, als Grundlage für die weitere Berechnung.

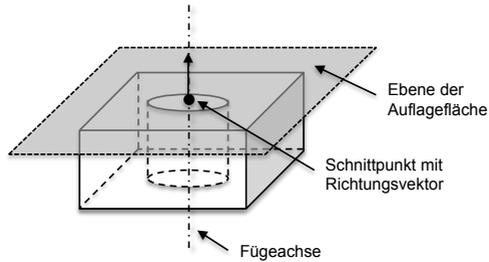


Abbildung 6.2.: Referenzelemente an einer Bohrung

Wenn also die Richtungsvektoren und Einfügepunkte einer Schraube und einer Bohrung bekannt sind, können diese im globalen Koordinatensystem des Produktes ausgedrückt und die Differenz zwischen beiden berechnet werden (siehe Abbildung 6.3).

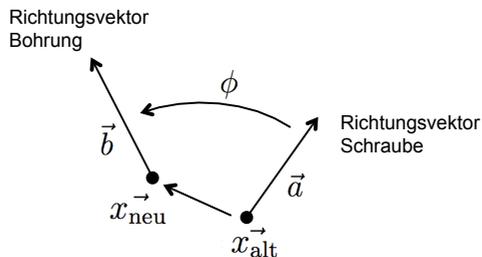


Abbildung 6.3.: Rotation und Verschiebung, um eine Schraube an einer Bohrung zu positionieren

Durch die Berechnung des Skalarproduktes der beiden Richtungsvektoren (siehe Formel 6.1) lässt sich der Winkel berechnen, um den der Richtungsvektor der Schraube gedreht werden muss.

$$\cos \phi = \frac{\vec{a} * \vec{b}}{|\vec{a}| * |\vec{b}|} \quad (6.1)$$

Die Berechnung der Verschiebung erfolgt durch die Berechnung der Lageunterschiede in x-, y- und z-Richtung der Einfügebunkte. Diese Transformationsmatrix (Formel 6.2) kann dann auf das zu positionierende Element angewendet werden.

$$x_{\text{neu}}^{\vec{}} = T * x_{\text{alt}}^{\vec{}} \quad (6.2)$$

Die Durchführung der beiden Berechnungen führt in jedem Fall zu einer korrekten Überlagerung der beiden Einfügebunkte der Bauteile. Für die Richtungsvektoren existieren jedoch zwei unterschiedliche Lösungen. Je nach Ausgangslage der beiden Bauteile können die beiden Vektoren entweder in die selbe oder in die entgegengesetzte Richtung zeigen. Stimmt die Ausrichtung nicht, muss ist eine Drehung des zu positionierten Bauteils um 180° notwendig (siehe Abbildung 6.4). Diese Drehung wird dadurch erreicht, indem die Richtung des Normalenvektors der Ebene umgekehrt wird.

Die Identifikation der Fügeachse und der Ebene der Auflagefläche erfolgt über Selektion im CAD-System. Aus den ausgewählten Flächen der Bauteile werden die benötigten Elemente berechnet. So kann beispielsweise die Mantelfläche und die Kopfauflagefläche einer Schraube bzw. die Bohrung und die Oberfläche eines Zielbauteils selektiert wer-

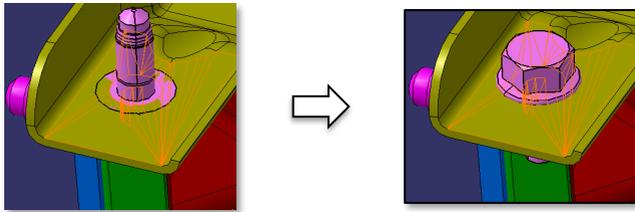


Abbildung 6.4.: Drehung der Schraube, falls der Richtungsvektor in die falsche Richtung zeigt

den, um daraus die entsprechenden Elemente zu berechnen. Wie Abbildung 6.5 zeigt, können die gleichen Informationen auch durch andere Selektionen berechnet werden. So liefert die Auswahl einer Kreislinie einen Mittelpunkt, eine Ebene und einen Orthogonalvektor. Wird ein Punkt auf einer ebenen oder gekrümmten Fläche selektiert, lässt sich auch hier ein Normalenvektor berechnen, welcher orthogonal zur Ebene steht.

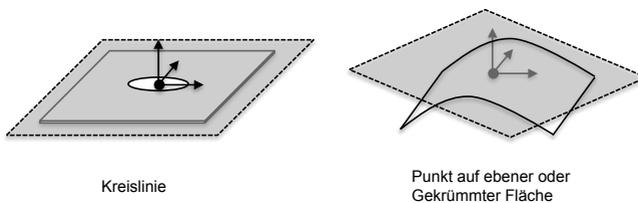


Abbildung 6.5.: Zusätzliche Möglichkeiten zur Bestimmung von Einfügepunkt und Richtungsvektor

### 6.1.3. Mehrfachpositionierung

Je nach Größe eines Bauteils, können für dessen Befestigung mehrere, gleichartige Verbindungselemente erforderlich sein. Auch hier kann der Prozess der Positionierung der Verbindungselemente beschleunigt werden. Da alle Verbindungselemente die gleichen geometrischen Merkmale besitzen, genügt es, diese einmal auszuwählen. Anschließend werden nur noch die notwendigen Elemente am Zielobjekt ausgewählt und die gewählten Verbindungshilfsmittel werden positioniert.

## 6.2. Dokumentation fester Verbindungen

Im dargestellten Produktentstehungsprozess werden Verbindungen und deren Verbindungselemente nachrangig betrachtet. Dies gilt insbesondere für die Positionierung der Verbindungshilfsmittel und die Dokumentation von Verbindungsinformationen für digitale Absicherungen. Daher erfordern digitale Absicherungen einen hohen manuellen Aufwand, um die entsprechenden Kontextinformationen zusammenzutragen und die 3D-Modelle so aufzubereiten, dass ein simulationsfähiges Modell entsteht. Um den Anforderungen der digitalen Absicherung gerecht zu werden, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuer Dokumentationsansatz für Verbindungen erarbeitet. Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit, die unterschiedlichen festen Verbindungen in einem einheitlichen Verbindungsmodell zu dokumentieren. Damit können weitere Informationen gespeichert werden, die nicht Bestandteil des Produktdatenmodells sein müssen. Der Ansatz schließt zum Einen die existierende Lücke in der Dokumentation und bildet zum Anderen die Schnittstelle zwischen dem Produktmodell und den Modellen der x-Systeme.

### 6.2.1. Verbindungsobjekt

Eine Verbindung beschreibt den Zusammenhalt von zwei oder mehreren Körpern. Diese Körper werden in einen Fügeprozess zusammengebracht oder durch einen Demontageprozess getrennt. Im Rahmen dieser Arbeit spielt die Beschreibung einer Verbindung und ihrer unterschiedlichen prozessualen Zustände eine besondere Rolle, da diese in digitalen Absicherungen simuliert und bewertet werden sollen. Die Erfassung dieser Informationen erfolgt in Verbindungsobjekten.

**Definition.** *Ein Verbindungsobjekt stellt eine informationstechnische Einheit dar, in welcher Informationen über Verbindungen (z.B. Verbindungspartner, -hilfsmittel, Prozessinformationen) dokumentiert und digitalen Absicherungen kontextbezogen zugänglich gemacht werden.*

Die Gestaltung von Verbindungsobjekten richtet sich nach den folgenden Paradigmen:

- Informationsbündelung
- Entkopplung

#### **Informationsbündelung**

Die Darstellung von Verbindungen erfolgt heutzutage entweder durch die Positionierung aller Einzelteilgeometrien, die zu einer Verbindung gehören oder durch Features innerhalb des CAD-Modells. Um Verbindungen in ein Simulation verwenden zu können, werden jedoch noch weitere Informationen benötigt. Daher werden in einem Verbindungsobjekt nicht nur geometrische Informationen einer Verbindung, sondern

auch zusätzliche Meta- bzw. Kontextinformationen gebündelt (siehe Abbildung 6.6).

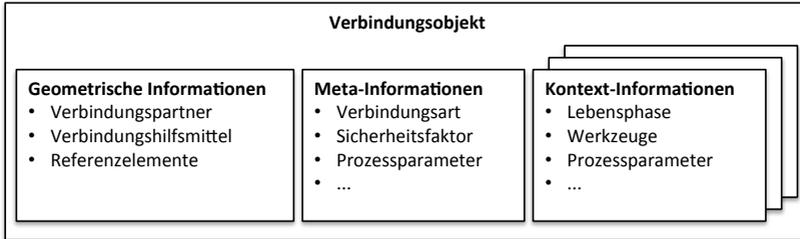


Abbildung 6.6.: Informationsbündelung in einem Verbindungsobjekt

### Entkopplung

Viele Prozesse der Produktentwicklung verarbeiten oder bearbeiten die vorhandenen Produktdaten, ohne dass diese mit dem PDM-System synchronisiert werden (vgl. Abschnitt 4.10 auf Seite 107). Beispielsweise werden Konstruktionsdaten in vielen Fachbereichen entlang des Produktentstehungsprozesses verwendet, um beispielsweise in der Produktionsplanung Prozesse und Betriebsmittel zu planen. Diese Informationen werden in den dortigen Systemen mit den Produktdaten verknüpft, sind jedoch nicht Bestandteil der Konstruktionsdaten, da in den meisten Fällen weder das CAD- noch das PDM-System mit diesen Informationen arbeiten können.

Dies geschieht vorrangig aus zwei Gründen: Parallelisierung und Entkopplung. Parallelisierung wird vor allem dort benötigt, wo zeitgleich mehrere Fachbereiche auf die gleichen Daten zugreifen müssen. Entkopplung spielt insbesondere dort eine Rolle, wo Informationen ver-

wendet werden, die nicht nativ vom PDM-System verwaltet werden. Viele Informationen in der Produktentwicklung dienen der Analyse und Informationsgewinnung. Das PDM-System organisiert diese Daten und erzeugt die notwendige Transparenz über die Veränderung der Produktdaten während der Produktentwicklung. Es ist daher nicht zwingend notwendig, alle Informationen im PDM-System zu hinterlegen.

### 6.2.2. Verbindungsinformationen

Eine Verbindung wird neben den geometrischen Elementen auch durch Meta-Informationen beschrieben. Diese Informationen gelten allgemein für eine Verbindung (z.B. Identifikationsnummer, Verbindungsart, Sicherheitsklassifizierung, etc.). Wie in Abbildung 6.7 dargestellt gelten manche dieser Informationen allgemein für eine Verbindung, während andere Informationsarten kontextabhängig variieren.

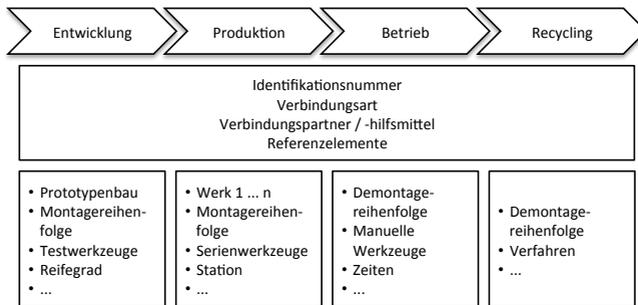


Abbildung 6.7.: Allgemeingültige und kontextabhängige Informationen einer Verbindung

### 6.2.2.1. Allgemeine Verbindungsinformationen

Manche Informationen gelten allgemein für eine Verbindung, während andere Informationsarten kontextabhängig variieren. Dieser Abschnitt beschreibt diejenigen Informationen, die allgemeingültig für eine Verbindung sind. Dazu gehören die folgenden Informationsarten:

- Eindeutige Identifikationsnummer
- Verbindungsart
- Verbindungspartner und Verbindungshilfsmittel
- Referenzelemente
- Sonstige Informationen

#### **Eindeutige Identifikationsnummer**

Aufgrund der stiefmütterlichen Behandlung von Verbindungen im heutigen Produktentstehungsprozess werden viele Verbindungen nicht eindeutig als solche im CAD-Modell gekennzeichnet. Dazu gehören beispielsweise Schraubverbindungen, die lediglich implizit als solche zu erkennen sind, jedoch nicht explizit als Schraubverbindung modelliert und dokumentiert werden. Damit wird es schwierig Informationen über diese Verbindungen eindeutig zuzuordnen. Dadurch erweist sich die Suche nach einer bestimmten Verbindung im Falle eines Problems als äußerst fehleranfällig und zeitraubend. Um diesen Zustand entgegen zu wirken, werden alle Verbindungen mit einer eindeutigen Identifikationsnummer erfasst. Diese stellt sicher, dass eine Verbindung eindeutig

wiedergefunden wird und relevante Verbindungsinformationen eindeutig zugeordnet werden können. Dadurch lassen sich die Ergebnisse einer Simulation besser zuordnen, wenn alle Verbindungen einen eindeutigen Kenner tragen. Die Identifikationsnummer gilt dabei für alle festen Verbindungsarten in einem Produkt.

### **Verbindungsart**

Jedes Verbindungsobjekt steht für eine bestimmte Verbindung und die dazugehörigen Verbindungsprozesse in den unterschiedlichen Lebensphasen. Sowohl die Prozesse als auch die entsprechenden Prozessinformationen sind von der Art der Verbindung abhängig. Daher wird eine Verbindung im ersten Schritt durch eine Verbindungsart klassifiziert.

Die Verbindungsart legt beispielsweise auch fest, ob eine Verbindung mit oder ohne Zusatzteile/-stoffe gefügt wird. Darüber hinaus richten sich auch die notwendigen Montage- bzw. Demontagewerkzeuge nach der Art der Verbindung. Die Verbindungsart bildet damit ebenfalls eine wichtige Information zur Verknüpfung von Produkt und x-System während der digitalen Absicherung.

### **Verbindungspartner und Verbindungshilfsmittel**

Um die geometrischen Elemente einer Verbindung miteinander in Beziehung zu setzen, werden an einem Verbindungsobjekt sowohl die Verbindungspartner als auch die relevanten Verbindungshilfsmittel verknüpft (siehe Abbildung 6.10 auf Seite 145). Dabei spielt es keine Rolle, auf welcher Ebene im Zusammenbau sich die einzelnen geometrischen Elemente befinden. Die Elemente werden aufgrund ihres Namens und ih-

rer Position in der Produktstruktur eindeutig identifiziert. Somit kann eindeutig zwischen mehreren gleichen Sachnummern innerhalb einer Produktstruktur unterschieden werden. Dazu wird eine Eigenschaft des PDM-Systems, der so genannte Relationszähler verwendet. Jede Strukturverknüpfung innerhalb des PDM-Systems wird dabei als Relation dargestellt. Werden unterhalb eines Strukturknotens mehrere Instanzen der gleichen Sachnummer verknüpft, wird der Relationszähler um eins erhöht. Da jede Produktstruktur, welche über das PDM-System geladen wird, immer inklusive des Baureihen-Knotens geladen wird, kann für jedes Bauteil ein eindeutiger, absoluter Pfad ermittelt werden.

Abbildung 6.8 zeigt beispielhaft die Vergabe von Relationszählern für gleiche Sachnummern unterhalb eines Strukturknotens. Alle Element unterhalb des Elementes „Baugruppe“ haben als Relationszähler die Zahl 1, da alle verschieden voneinander sind. „Einzelteil 4“ wiederum kommt mehrfach unterhalb des Elementes „Unterbaugruppe“ vor. Daher wird hier der Relationszähler hochgezählt, so dass jede Instanz eindeutig identifiziert werden kann. Die gleichen Pfade werden später ausgewertet, um Verbindungsobjekte wieder eindeutig einer geladenen Produktstruktur zuzuordnen.

### **Referenzelemente**

Bisher werden Referenzelemente vorrangig im Bereich Karosserierohbau dazu verwendet, um Produktionsroboter zu programmieren und entsprechende digitale Werkzeugabsicherungen durchzuführen. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieses Konzept generalisiert und damit auch für andere Verbindungsarten nutzbar gemacht. Referenzelemente geben Aufschluss über die Lage und Orientierung einer Verbindung in-

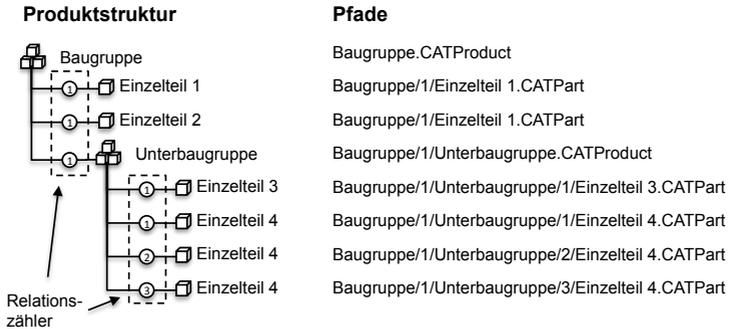


Abbildung 6.8.: Bildung von Pfaden auf Basis des Relationszählers für gleiche Sachnummern unterhalb eines Strukturknotens

nerhalb eines Produktes. Diese Information wird mathematisch durch einen Punkt- und einen Richtungsvektor definiert. Wie in Abbildung 6.9 zu sehen, wird beispielsweise bei einer Schraubverbindung die Lage an der Schnittstelle zwischen Kopfauffläche und Längsachse der Schraube definiert. Diese Position wird vorrangig deshalb gewählt, da ein entsprechendes Montagewerkzeug über die gleichen Parameter eindeutig an der Schraube positioniert werden kann. Die Realisierung solcher Referenzelemente erfolgt dabei über Features (vgl. Abschnitt 3.2.2 auf Seite 67).

Bezogen auf die unterschiedlichen Verbindungsarten beschreiben Referenzelemente in erster Linie die Relation zwischen Produkt und x-System. Dazu ist es auf der anderen Seite aber auch notwendig, die vorhandenen Werkzeuggeometrien entsprechend aufzubereiten, so dass diese für eine schnelle Verknüpfung auf Basis von Referenzelementen zur Verfügung stehen.

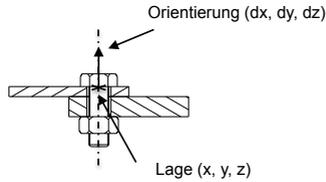


Abbildung 6.9.: Dokumentation von Referenzelementen in Verbindungsobjekten am Beispiel einer Schraubverbindung

### Sonstige Informationen

Neben den bereits beschriebenen Informationen können noch weitere, allgemeingültige Informationen dokumentiert werden. Dazu zählt beispielsweise die Sicherheitsklassifizierung nach VDI 2862 [VDI99b], die Einfluss auf die Auswahl entsprechender Montagesysteme in der Serienproduktion nimmt.

#### 6.2.2.2. Kontextabhängige Verbindungsinformationen

Neben den Informationen, die für alle Lebensphasen eines Produktes gleich bleiben, gibt es auch Verbindungsinformationen, die abhängig von der jeweiligen Kontext sind. Dadurch ist es notwendig, diese Informationen getrennt voneinander im Datenmodell zu berücksichtigen. Zu diesen Informationen zählen:

- Kontextinformationen
- Werkzeuginformationen
- Absicherungsergebnisse

## **Kontextinformationen**

Abbildung 6.14 auf Seite 151 zeigt das Zusammenspiel der unterschiedlichen x-Systeme in den einzelnen Lebensphasen eines Produktes. Jedes x-System bzw. jede Phase bildet einen eigenen Kontext, für den auch jeweils andere Informationen gültig sein können. Lebensphasenabhängige Informationen können beispielsweise Prozessparameter für die Produktion oder den Service sein (z.B. Drehmoment- oder Toleranzangaben, etc.). Im Wesentlichen hängen die gewählten Informationen immer von der Verbindungsart und den zu versorgenden Nachfolgeprozessen ab. Diesem Umstand wird Rechnung getragen, indem diese Informationen an Verbindungsobjekten dokumentiert werden. Mögliche Lebensphasen sind Prototypenbau, Produktionstests, Serienproduktion, Service oder Recycling. Diese Auflistung erhebt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da die Anzahl der relevanten Lebensphasen und deren Detaillierung in jedem Unternehmen anders ausgeprägt sein kann. Ebenfalls von Interesse ist der aktuelle Aufbauzustand des Produktes. Der Aufbauzustand ergibt sich entweder aus einer Montage- oder Demontagerihenfolge, welche in den entsprechenden Planungssystemen dokumentiert ist. Dieser ist insofern wichtig, da alle aktuell verbauten Bauteile Störkonturen darstellen, mit denen ein Werkzeug kollidieren kann. Diese Störkonturen müssen bekannt und reproduzierbar sein, um bei einer Veränderung des Produktes oder des Werkzeugs eine Veränderung der Simulationsergebnisse aufzeigen zu können.

## **Werkzeuginformationen**

Neben den geometrischen Eigenschaften sind unterschiedliche Werkzeuge auch an einen Einsatzzweck gebunden. Dieser ergibt sich bei-

spielsweise aus prozessorientierten Fragestellungen, wie etwa gefordertem Drehmoment oder Prozesssicherheit. Hierbei weisen die Werkzeuge unterschiedliche Charakteristika auf, die bereits zu einer Vorausswahl führen. Hinzu kommen firmenspezifische Vorgaben. Diese sehen beispielsweise bestimmte Werkzeuge im Prototypenbau oder der Serienmontage vor. Abhängig vom geplanten Produktionsstandort können beispielsweise Werkzeuge unterschiedlicher Hersteller bevorzugt werden. Die Serienmontage unterscheidet sich ihrerseits wiederum von der Werkstattmontage, welche einen wesentlich geringeren Automatisierungsgrad vorsieht. Werkzeuge werden nicht nur durch ihre Geometrie, sondern auch durch Meta-Informationen beschrieben. Über diese Informationen kann gesteuert werden, welche Werkzeuge für welchen Einsatzzweck verwendet werden dürfen. Hierbei spielen insbesondere die geometrischen Eigenschaften von Verbindungen eine große Rolle. Eine der wichtigsten Relationen bei der digitalen Absicherung von Verbindungen ist hierbei die Art der Verbindung. Beispielsweise wird eine Schraube mit Außensechskantschraubenkopf ein anderes Werkzeug erfordern, als ein Schweißpunkt.

### **Absicherungsergebnisse**

Die Dokumentation von Absicherungsergebnissen hilft dem Konstrukteur eine Simulationsszene erneut aufzubauen. Dies ist in den Fällen notwendig, in denen während einer Simulation Kollisionen entdeckt wurden, die eine Veränderung des Produktes oder des Werkzeugs notwendig machen. Um die Auswirkungen dieser Änderungen überprüfen zu können, muss die gleiche Simulation noch einmal durchgeführt und mit dem ursprünglichen Simulationsergebnis verglichen werden. Werden während einer Simulation Probleme entdeckt, müssen diese durch

entsprechende Maßnahmen abgestellt werden. Eine Dokumentation der getroffenen Entscheidungen und Maßnahmen hilft dem Konstrukteur, bereits getroffene Entscheidungen nachzuvollziehen. Damit ergibt sich aus der Dokumentation der Simulationsergebnisse eine Aussage bzgl. des Reifegrads eines Produktes, bezogen auf die jeweiligen Kontexte. Erst wenn alle Kontexte ohne Probleme simuliert werden können, besitzt das Produkt den notwendigen Reifegrad, mit dem es hergestellt, betrieben und später auch wieder entsorgt werden kann.

### 6.2.3. Verbindungsstruktur

Dieser Abschnitt beschreibt die Verwaltung von Verbindungsobjekten. Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit eine eigene Struktur entwickelt, die sich auch mit dem Thema der Produktvarianz auseinandersetzt. Gespeichert wird diese Struktur in einer eigenen Datenbank. Nachfolgend werden daher die folgenden Themen erörtert:

- Parallele Verwaltung in einer Verbindungsstruktur
- Variantenmanagement
- Verbindungsdatenbank

#### **Parallele Verwaltung in einer Verbindungsstruktur**

Wie in Abschnitt 3.2 auf Seite 61 dargestellt, können Verbindungen auf unterschiedlichen Ebenen in einem Zusammenbau dokumentiert werden. Sowohl die Dokumentation auf Ebene des Zusammenbaus als auch auf der Ebene der Einzelteile bieten unterschiedliche Möglichkeiten die-

se Informationen zu dokumentieren. Verbindungsinformationen können entweder Bestandteil der CAD-Daten oder der Daten im PDM-System sein. Die in den vorhergehenden Abschnitten besprochenen Anforderungen lassen sich nur bedingt als reine CAD-Lösung realisieren. Auch die Handhabung von Produktvarianten gestaltet sich schwierig, wenn Verbindungsinformationen Elementen der Produktstruktur zugeordnet werden. Es ist nie sichergestellt, dass die informationstragenden Elemente in jeder Produktvariante vorhanden sind. Selbst wenn es sich um eigenständige Elemente in der Produktstruktur handelt, so wie es beispielsweise bei Vielhaber [Vie05] vorgeschlagen wird. Diese Art der Dokumentation würde für die Produktdokumentation ein weiteres zu dokumentierendes Bauteil darstellen. Umgekehrt lassen sich Verbindungen aber aufgrund der verbauten Einzelteile identifizieren, so dass keine explizite Dokumentation für einzelne Produktvarianten notwendig ist. Verbindungsobjekte sind somit nicht zwingend einem Bauteil oder einer Baugruppe der Produktstruktur zuzuordnen. Darüber hinaus verwalten Verbindungsobjekte Informationen, die weit über den reinen Konstruktionskontext hinaus gehen. Um die Unabhängigkeit von Verbindungsinformationen von Einzelteilen bzw. Zusammenbaustufen zu gewährleisten, werden Verbindungsobjekte parallel zur existierenden Produktstruktur aufgebaut (siehe Abbildung 6.10).

Dabei erfolgt die Organisation der Verbindungsobjekte in einer eigenen Verbindungsstruktur. Die Verbindungsobjekte selbst wiederum speichern Referenzen auf die einzelnen, zu verbindenden Verbindungspartner bzw. Verbindungshilfsmittel. Diese Art der Informationsverwaltung wirkt sich daher nicht auf die Strukturen im PDM-System aus, garantiert aber, dass die Verknüpfung zu den ursprünglichen Daten nicht verloren geht.

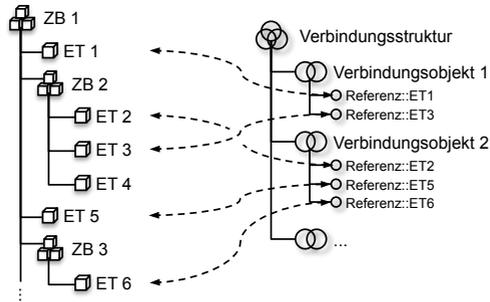


Abbildung 6.10.: Verwaltung von Verbindungsobjekten in einer eigenen Struktur

## Variantenmanagement

Eine Verbindung ist immer an die zu verbindenden Einzelteile gekoppelt. Innerhalb einer Produktstruktur lässt sich jedes Einzelteil eindeutig über seine Position innerhalb der Produktstruktur identifizieren. Die Abbildung unterschiedlicher Produktvarianten in einer Produktstruktur erfolgt schließlich durch Konfiguration von Einzelteilen oder ganzen Baugruppen. Somit können auch die zugehörigen Verbindungen eindeutig über die verbauten Einzelteile in dieser variantenbehafteten Struktur identifiziert werden. Wie in Abbildung 6.11 dargestellt, genügt die Verwendung der relevanten Einzelteile, um die entsprechenden Verbindungsobjekte eindeutig zu identifizieren.

Durch diese Art der Dokumentation spielt es keine Rolle, ob sich die zu verbindenden Bauteile auf der gleichen Ebene innerhalb eines Zusammenbaus oder auf unterschiedlichen Ebenen befinden. Sobald die relevanten Einzelteile einer Verbindung in einer Produktstruktur vorhanden sind, kann die Verbindung dargestellt werden. Indem eine eige-

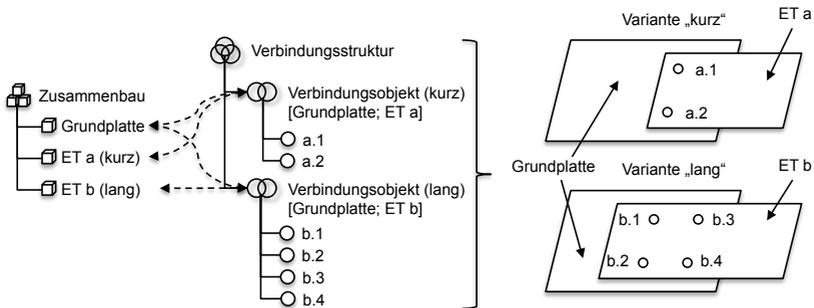


Abbildung 6.11.: Abbildung von Verbindungen in variantenreichen Strukturen

ne Verbindungsstruktur aufgebaut wird, ermöglicht man dem Entwickler weiterführende Informationen zu dokumentieren, welche ein reines CAD-Modell überfrachten würden (z.B. Prozessinformationen, Simulationsergebnisse, etc.). Diese Informationen sind hauptsächlich für die Simulation von Lebensphasen des Produktes notwendig. Eine einzige, vom PDM-System gesteuerte Datenstruktur würde immer nur einem einzigen Benutzer das Editieren der Daten erlauben. Durch die Entkopplung lassen sich beide Strukturen (Konstruktions- und Simulationsstruktur) unabhängig voneinander bearbeiten und nutzen, ohne dass die Anwender dabei eingeschränkt werden.

### Verbindungsdatenbank

Die Verwendung von Verbindungsinformationen für die digitale Absicherung ist zentraler Bestandteil dieses Konzeptes. Die Menge der hierbei anfallenden Informationen würde ein CAD-Modell überfrachten.

Um die Performance beim Arbeiten mit CAD-Modellen nicht negativ zu beeinflussen, wird verstärkt darauf geachtet, die Dateigröße dieser Modelle nicht zu groß werden zu lassen, als dies unbedingt notwendig ist. Viele Folgeprozesse erhalten sogar keine nativen CAD-Daten, sondern bereits reduzierte Daten in Ersatzformaten (z.B. .jt oder .cgr), da diese Informationen zum Vermessen, Schwerpunktbestimmung und Visualisieren ausreichen.

Daher werden Verbindungsinformationen in einer eigenständigen Verbindungsdatenbank dokumentiert. Aus funktionaler Sicht ist zur Erstellung von Verbindungen immer ein Produktdatenmodell notwendig. Dieses wird über ein PDM-System zur Verfügung gestellt. Die Erstellung einer vollständigen Simulationsszene benötigt wiederum Informationen über das jeweilige x-System. Diese Informationen werden aus einer Werkzeugdatenbank generiert. Letzten Endes fließen alle Informationen im CAD-System zusammen (siehe Abbildung 6.12).

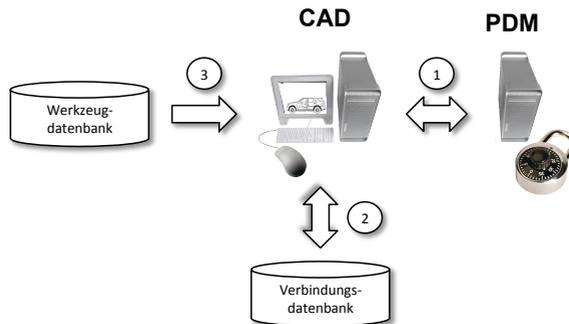


Abbildung 6.12.: Systemlandschaft zur Dokumentation und kontextorientierten Absicherung von Verbindungen

Die bi-direktionale Schnittstelle zwischen CAD- und PDM-System (Abbildung 6.12, Nr. 1) entspricht der regulären Datenversorgung in der Produktentwicklung. Über diese Schnittstelle wird 3D-Geometrie in das CAD-System geladen und Änderungen zurück in das PDM-System gespeichert. Verbindungsinformationen werden über eine eigene Schnittstelle zur Verbindungsdatenbank dokumentiert (Abbildung 6.12, Nr. 2). Dabei handelt es sich ebenfalls um eine bi-direktionale Schnittstelle, da die Informationen sowohl gelesen als auch gespeichert werden. Zur vollständigen Erstellung einer Simulationsszene wird schließlich noch eine Werkzeugdatenbank an das CAD-System gekoppelt (Abbildung 6.12, Nr. 3). Über diese Schnittstelle werden Werkzeugteile in eine Szene geladen und zu einen vollständigen Werkzeug zusammgebaut.

### 6.3. Digitale Absicherung fester Verbindungen

Der Prozess der digitalen Absicherung beruht auf der Analyse der vorhandenen Ist-Eigenschaften eines Systems und dem Vergleich mit den geforderten Soll-Eigenschaften. Die digitale Absicherung einer Verbindung beschränkt sich jedoch nicht nur auf das Produkt oder ein spezielles x-System. Die Absicherung fester Verbindungen geschieht vielmehr im Zusammenspiel von Produkt und x-System. Zusätzlich ändern sich die x-Systeme über den Lebenslauf eines Produktes. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die relevanten Zusammenhänge und welche Rolle diese bei der Gestaltung der Dokumentation von Verbindungen spielen.

### 6.3.1. Relation zwischen Produkt und x-System

In Anlehnung an das Characteristics-Property Modell von Weber (vgl. Abschnitt 2.6 auf Seite 27) werden Merkmale und Eigenschaften über Relationen miteinander verknüpft. Wie in Abbildung 6.13 dargestellt, lassen sich über dieses Modell auch die Merkmale und Eigenschaften zusätzlicher x-Systeme verknüpfen. Während einer Analyse wird das Zusammenspiel von Produkt und x-System in einem gemeinsamen Kontext betrachtet und ermittelt, in wie weit die geforderten Soll-Eigenschaften mit den vorliegenden Ist-Eigenschaften übereinstimmen.

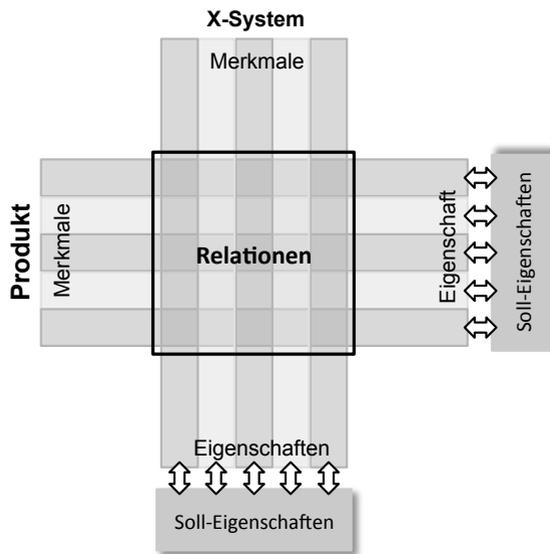


Abbildung 6.13.: Verknüpfung von Merkmalen des Produktes und Merkmalen des x-Systems während der digitalen Absicherung

### 6.3.2. Kontext der digitalen Absicherung

Eine Absicherung findet immer in einem definierten Kontext statt. Gemäß der Definition aus Kapitel 1 auf Seite 11 beschreibt der Kontext die Summe der äußeren Einflüsse, die sich in einer konkreten Situation auf eine Entität auswirken. Während einer digitalen Absicherungsuntersuchung sind, bezogen auf den Kontext, drei Fragestellungen von besonderem Interesse:

- Welche äußeren Einflüsse wirken sich auf eine Entität aus?
- Welche Relationen zwischen Produkt und x-System werden für die digitale Absicherung benötigt?
- Welche Freiheitsgrade existieren bei der Variation der äußeren Einflüsse?

#### **Welche äußeren Einflüsse wirken sich auf eine Entität aus?**

Die Frage nach den äußeren Einflüssen gibt Aufschluss über die Randbedingungen für den Aufbau eines Simulationsmodells. Dazu gehören beispielsweise Informationen über die jeweils zu betrachtende Lebensphase und die zum Einsatz kommenden x-Systeme. Darüber hinaus muss auch beschrieben werden, in welchem Aufbauzustand (z.B. bei einer gegebenen Montagereihenfolge) sich das Produkt befindet und welche zusätzlichen Elemente (z.B. Werkzeuge, Haltevorrichtungen) zur Durchführung einer Simulation benötigt werden. Prinzipiell kann jede Lebensphase durch ein anderes x-Systeme repräsentiert werden (siehe Abbildung 6.14). Diese gilt es zu identifizieren und in einer Simulationsszene aufzubauen.

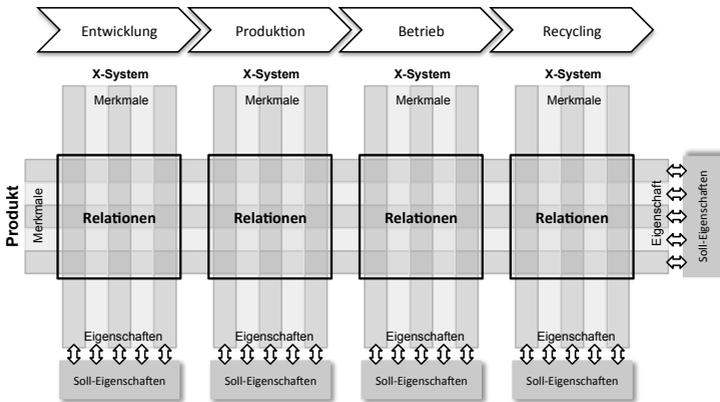


Abbildung 6.14.: Zusammenspiel der Anforderungen an das Produkt und den Anforderungen der unterschiedlichen Lebensphasen

### Welche Relationen zwischen Produkt und x-System werden für die digitalen Absicherung benötigt?

Die Relationen zwischen Produkt und x-System bilden die Schnittstellen zwischen den beiden Modellen während einer Simulation. An diesen Schnittstellen kommt es zu einer gegenseitigen Einflussnahme. Daher ist es wichtig für den jeweiligen Kontext die entsprechenden Schnittstellen zu kennen und zu nutzen. Im Falle einer Montageverbindung existiert beispielsweise eine eindeutige Beziehung zwischen der Geometrie des Verbindungselementes und der Geometrie eines Montagewerkzeugs. Passen diese beiden Parameter nicht zueinander sind die Ergebnisse der Simulation nur bedingt von Nutzen.

### **Welche Freiheitsgrade existieren bei der Variation der äußeren Einflüsse?**

Durch Variation bestimmter Parameter lassen sich während einer digitalen Absicherung Änderungen an den verwendeten Modellen vornehmen. Diese Variation dient der Optimierung des Simulationsablaufs. Dazu ist es notwendig zu wissen, welche Freiheitsgarde während einer Simulation genutzt werden können. Aufschluss darüber gibt beispielsweise der Reifegrad des Produktes bzw. des x-Systems. Dabei kann entweder das Produkt oder das x-System durch geometrische Änderungen variiert werden, um die jeweils geforderten Eigenschaften zu erfüllen. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge innerhalb des Produktes und des x-Systems, können die geforderten Soll-Eigenschaften nicht immer vollständig, sondern meist nur annähernd erfüllt werden ( $\Delta P \approx 0$ ). Existiert bereits ein x-System und soll dieses keinen Änderungen mehr unterworfen werden, so können die geforderten Soll-Eigenschaften nur über eine Variation der Produktparameter erreicht werden. Umgekehrt kann auch ein x-System mit Blick auf ein bereits existierendes Produkt entwickelt werden. In diesem Fall versucht man die geforderten Soll-Eigenschaften über Variation der x-System-Parameter zu erreichen. Findet eine zeitgleiche Entwicklung (Concurrent Engineering) von Produkt und x-System statt, können beide Modellparameter variiert werden (siehe Abbildung 6.15).

Prinzipiell kann auch der Prozess verändert werden, beispielsweise indem die Reihenfolge der verbauten Einzelteile beeinflusst wird. Das Ergebnis einer solchen Änderungen bedeutet aber wiederum, dass sich der Bauraum und damit die vorhandenen Störkonturen verändert haben, was letzten Endes einer geometrischen Veränderung des Produktes entspricht.

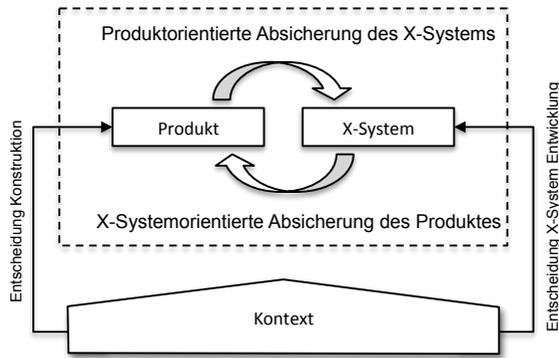


Abbildung 6.15.: Freiheitsgrade bei der Absicherung von Produkt und x-System

### 6.3.3. Prozess der digitalen Absicherung

Gemäß der Richtlinie VDI3633 Blatt 3 (vgl. Abschnitt 3.5.1 auf Seite 79), werden bei einer systematischen Simulation die Phasen Planung, Durchführung und Auswertung durchlaufen [VDI97]. Die digitale Absicherung, bezogen auf die unterschiedlichen Lebensphasen des Produktes, erfordert die Erweiterung dieses Ablaufs durch den Kontext. Je nach Kontext und Aufgabenstellung kann dieser Ablauf unterschiedlich ausgeprägt sein und unter Umständen mehrfach durchlaufen werden (siehe Abbildung 6.16).

#### Klärung der Aufgabenstellung

Der Ablauf einer digitalen Absicherung beginnt mit der Klärung der Aufgabenstellung. Dabei wird geklärt, in welchem Kontext die digita-

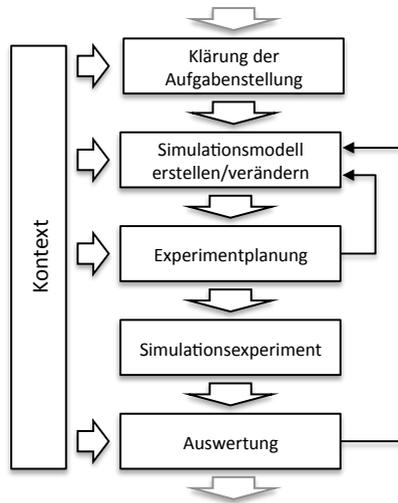


Abbildung 6.16.: Berücksichtigung des Kontextes bei der Planung, Durchführung und Auswertung von digitalen Absicherungen, nach [VDI97]

le Absicherung durchgeführt wird (vgl. Abschnitt 6.3.2 auf Seite 150). Der Kontext liefert wertvolle Informationen für den Aufbau des Simulationsmodells, zum Beispiel den Aufbauzustand des Produktes bzw. x-Systems. Darüber hinaus werden die relevanten Soll-Eigenschaften des Produktes und des x-Systems identifiziert.

Die Soll-Eigenschaften entsprechen hierbei im weitesten Sinne der Aufgabenstellung der digitalen Absicherung. Die Zielsetzung während der Produktentstehung besteht im Wesentlichen darin, mithilfe der digitalen Absicherung das Delta zwischen den identifizierten Ist- und den geforderten Soll-Eigenschaften zu ermitteln, um dieses anschließend zu minimieren.

#### **Simulationsmodell erstellen/verändern**

Die in der ersten Phase gewonnenen Informationen werden zunächst dazu verwendet das passende Simulationsmodell zu erstellen. In diesem Modell werden die Geometrien des Produktes und des x-Systems zusammengebracht. Da sowohl das Produkt als auch das x-System meist unabhängig voneinander entwickelt werden, erfordert dieser Schritt oft einen hohen manuellen Aufwand, um beide Modelle zusammenzubringen.

Um die Modellerstellung bestmöglich zu unterstützen, ist es notwendig die Relationen bzw. Schnittpunkte zwischen den beiden Modellen zu identifizieren und zu nutzen. Im Fall der digitalen Werkzeugabsicherung bestehen diese Schnittpunkte beispielsweise in den Referenzelementen an den Verbindungselementen und den Werkzeuggeometrien. Diese Referenzelemente ermöglichen ein direktes Verknüpfen beider Modelle, beispielsweise für die automatisierte Positionierung und Ausrichtung von Werkzeugmodellen im Bauraum eines Produktes. Abhängig vom jeweiligen Kontext bietet das Simulationsmodell gewisse Freiheitsgrade, um Modellparameter zu variieren. Die Variation dieser Parameter kann beispielsweise während der Simulation genutzt werden, um unterschiedliche Simulationsläufe durchzuführen, ohne die Simulation von Grund auf neu zu erstellen. Dazu kann das Simulationsmodell in einem iterativen Prozess nach einem Simulationslauf erneut verändert werden.

#### **Experimentplanung**

Basierend auf den eingangs ermittelten Soll-Eigenschaften kann es notwendig sein, die Variation der Simulationsparameter zu variieren. Mit

Hilfe einer geplanten Reihe von Variationen lassen sich digitale Absicherungsuntersuchungen automatisieren. Außerdem kann somit ein breites Spektrum an Simulationen erstellt werden, welches dem Konstrukteur ein umfassendes Bild über die möglichen Handlungsalternativen liefert. Beispielsweise kann eine solche Simulation unterschiedliche Werkzeuge an der gleichen Verbindung testen und anschließend eine Zusammenfassung der Ergebnisse erzeugen. Wird dieses Vorgehen für mehrere Verbindungen innerhalb einer Montagestation durchgeführt, erhält der Konstrukteur bzw. Produktionsplaner Aufschluss darüber, ob alle gleichartigen Verbindungen mit dem selben Werkzeug gefügt werden können, oder ob ein Werkzeugwechsel notwendig ist. Diese Erkenntnisse können unmittelbar in eine Kostenbewertung und Entscheidung einfließen.

### **Simulationsexperiment**

In dieser Phase erfolgt die eigentliche Durchführung der Simulation. Dabei werden die unterschiedlichen Geometrien in einer gemeinsamen Simulationsszene positioniert und Bewegungspfade analysiert. Bei der digitalen Werkzeugabsicherung werden die vorhandenen Geometrien auf Kollisionen untersucht. Die Qualität der vorhandenen Daten ist dabei entscheidend für die Effizienz der Simulation.

Je besser die Produktdaten und die Daten des x-Systems für digitale Absicherungen optimiert sind, desto schneller können Simulationsmodelle erstellt und die Durchführung der Simulation automatisiert werden. Unvollständig oder fehlerhaft positionierte Verbindungselemente müssen daher im Vorfeld ausgeschlossen bzw. korrigiert werden.

## **Auswertung**

Die Auswertung bestimmt das weitere Vorgehen während der digitalen Absicherung. Sind die geforderten Soll-Eigenschaften erfüllt, z.B. der Fügevorgang kann ohne Kollisionen zwischen Werkzeug und Bauteilen durchgeführt werden, wird die Simulation beendet. Treten jedoch Kollisionen auf, wird das Simulationsmodell gemäß den eingangs identifizierten Freiheitsgraden variiert. Das bedeutet, dass Bauteile des Produktes oder der Werkzeuge verändert werden. Damit begibt man sich wieder in die Phase der Erstellung des Simulationsmodells. Durch Iterationen lassen sich so mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlichen Parametern durchführen. Führt die Variation der Parameter nicht zum gewünschten Ergebnis, wird die Simulation abgebrochen oder Änderungen beschlossen, die sich nicht im Rahmen der Simulation umsetzen lassen, sondern beispielsweise zu konstruktiven Veränderungen des Produktes führen.

## **6.4. Fazit**

Im Rahmen dieser Arbeit spielt die digitale Absicherung von festen Verbindungen, bezogen auf die unterschiedlichen Lebensphasen des Produktes, eine zentrale Rolle. Dazu wurde in diesem Kapitel ein Konzept erarbeitet, mit dessen Hilfe die Lücke zwischen Produktentwicklung und -absicherung geschlossen wird. Zentrales Element ist die einheitliche Dokumentation von festen Verbindungen in Verbindungsobjekten. Diese Objekte speichern zusätzliche Informationen über Verbindungen und erlauben die Zuordnung von Informationen zu unterschiedlichen Kontexten (Lebensphasen) des Produktes, welche während digitalen Absicherungsuntersuchungen genutzt werden. Gespeichert werden diese

Objekte in einer eigenständigen Verbindungsdatenbank, so dass das eigentliche Datenmodell des Produktes nicht unnötig vergrößert wird. Im nachfolgenden Kapitel wird die prototypische Implementierung dieses Konzeptes beschrieben und anhand von Szenarien die Funktionsweise demonstriert.

## **7. Prototypische Umsetzung und kritische Bewertung**

Dieses Kapitel beschreibt die Realisierung und Bewertung der entwickelten Konzepte zur Dokumentation und kontextorientierten Absicherung von festen Verbindungen. Der erste Teil dieses Kapitels beschreibt die Erstellung von Verbindungen unter Verwendung der erweiterten Möglichkeiten zur Positionierung von Verbindungshilfsmitteln im CAD-System. Daran anschließend erfolgt die Dokumentation der Verbindungen sowie deren kontextorientierte Absicherung. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einer kritischen Bewertung der vorgestellten Lösungen.

### **7.1. Erstellung von Verbindungen**

Die Grundlage für die Erstellung von Verbindungen stellen die Produktdaten des PDM-Systems dar. Daher muss zunächst eine Produktstruktur mit den entsprechenden Geometrien geladen werden. Je nach Reifegrad des Produktes kann es zu Veränderungen an den Einzelteilen kommen. Daher muss zunächst überprüft werden, ob sich auch alle Verbindungshilfsmittel in der korrekten Lage befinden. Ist dies nicht der Fall, müssen diese zunächst korrekt positioniert werden. Dazu werden im nachfolgenden Abschnitt Algorithmen vorgestellt, die den Konstruk-

teur bei dieser Tätigkeit unterstützen. Die Erstellung von Verbindungen erfolgt in mehreren Schritten. Je nach Qualität der vorliegenden Produktdaten erfordert die Erstellung einen oder mehrere Positioniervorgänge im CAD-System. Wie in Abbildung 7.1 dargestellt, sind hierzu sowohl im PDM- als auch im CAD-System gewissen Arbeitsschritte zu absolvieren.

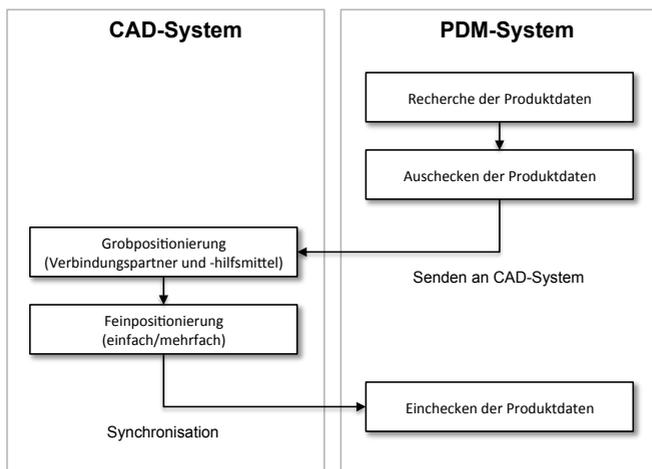


Abbildung 7.1.: Arbeitsschritte bei der Erstellung von Verbindungen

Um eine Schraubverbindung für ein konkretes Fahrzeugprojekt erstellen zu können, ist es notwendig die Fahrzeugdaten sowie die erforderlichen Verbindungshilfsmittel im PDM-System zu recherchieren. Sobald diese Informationen in einer Produktstruktur vorliegen, können diese ausgecheckt (schreibender Zugriff auf die Daten) und zum CAD-System gesendet werden. Um das Ergebnis der Manipulationen im CAD wieder zu speichern, erfolgt eine Synchronisation zwischen CAD- und PDM-System. Dabei werden geometrische Änderungen oder Änderungen der

Bauteillagen (geänderte Transformationsmatrizen) im PDM-System gespeichert. Damit diese Änderungen auch für alle anderen Anwender sichtbar werden, müssen die Einzelteile im PDM-System wieder eingecheckt werden.

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte exemplarische an der Positionierung von Schrauben an einem Bauteil vorgestellt. Das Vorgehen lässt sich allerdings auch auf andere Kleinteile übertragen.

### 7.1.1. Grobpositionierung

Durch die Grobpositionierung kann ein Bauteil unmittelbar in die Nähe der Zielposition (z.B. eine Bohrung) bewegt werden. Dazu bewegt sich der Konstrukteur zunächst zum Zielobjekt und zoomt nahe heran. Anschließend ruft er die Funktionalität für die Grobpositionierung im CAD-System auf und selektiert die zu bewegend Komponente im Produktstrukturbaum. Dieses wird dadurch im Blickzentrum am Zielobjekt positioniert (Abbildung 7.2).

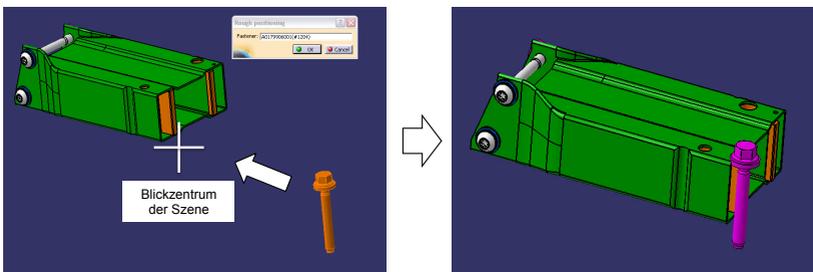


Abbildung 7.2.: Grobpositionierung einer Schraube in der Nähe eines Bauteils

### 7.1.2. Feinpositionierung

Für eine genaue Positionierung eines Verbindungshilfsmittels an einer Bohrung steht ein weiteres Werkzeug zur Verfügung: die Feinpositionierung. Wie in Abbildung 7.3 dargestellt, werden zunächst an der Schraube die benötigten Referenzelemente selektiert, aus denen der Algorithmus eine Ebene und einen Normalenvektor errechnen kann. In Abbildung 7.3 wurden hierfür beispielsweise die Mantelfläche des Schraubenschafts „Cylinder“ und die Kopfauflagefläche „Face“ selektiert. Die gleiche Selektion kann der Konstrukteur nun an einer Bohrung des Zielbauteils vornehmen. Daraufhin findet eine automatische Positionierung der Schraube an der Bohrung statt. Falls die Schraube „auf dem Kopf“ steht, kann diese über eine Switch-Funktion sofort um  $180^\circ$  gedreht werden.

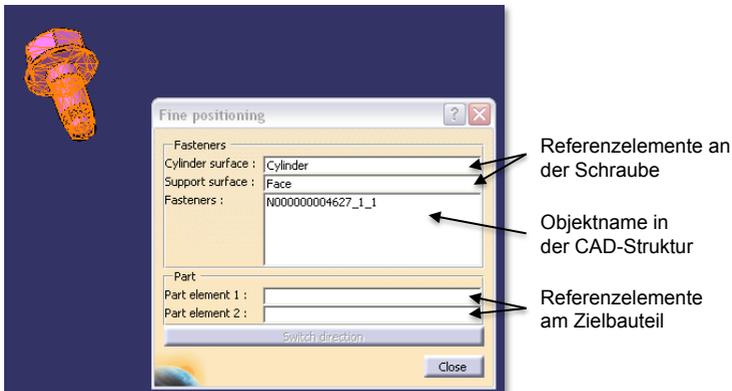


Abbildung 7.3.: Selektion von Referenzelementen an einer Schraube für eine Feinpositionierung

Prinzipiell können auch andere Referenzelemente am Bauteil selektiert werden, so lange das System daraus die relevanten geometrischen Informationen extrahieren kann. So liefert beispielsweise die Auswahl einer Kreislinie genau die selben Informationen, da sich die Kreislinie in einer Ebene befindet und der Normalenvektor durch den Mittelpunkt des Kreises verläuft.

### 7.1.3. Mehrfachpositionierung

Die Mehrfachpositionierung erweitert die Feinpositionierung um die Möglichkeit mehrere, gleichartige Elemente zu positionieren. Dafür genügt es, wenn die Referenzelemente am Verbindungselement lediglich einmal selektiert werden, da diese Informationen auch auf alle anderen, gleichartigen Verbindungselemente zutreffen. Nun müssen nur noch die anderen Objekte im Strukturbaum oder im 3D-Modell selektiert werden. Die ausgewählten Elemente erscheinen dann in der Liste der zu positionierenden Elemente. Nun kann sich der Konstrukteur über sein Zielbauteil bewegen und auch dort wieder Referenzelemente selektieren. Dabei wird die Liste der zu positionierenden Elemente abgearbeitet und positionierte Elemente werden aus der Liste entfernt (Abbildung 7.4).

Diese Arbeitsweise bietet die meisten Vorteile bei der Positionierung von Verbindungselementen, da sich der Konstrukteur nach der Auswahl der zu positionierenden Bauteile und der Referenzelemente nur noch am Zielobjekt bewegen muss. Somit ist vollkommen gleichgültig, wo sich die Verbindungselemente aktuell befinden.

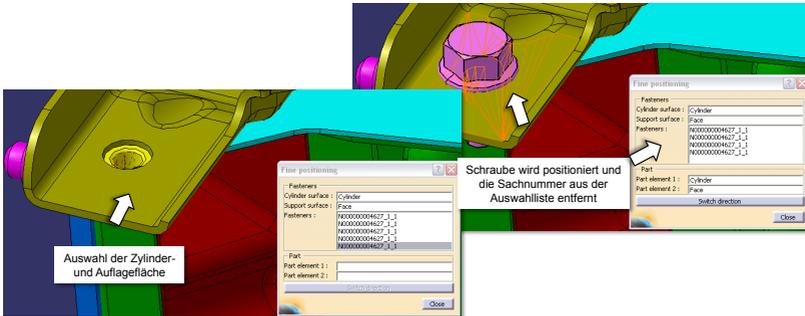


Abbildung 7.4.: Mehrfache Positionierung gleichartiger Verbindungselemente

## 7.2. Dokumentation von Verbindungen

Dieser Abschnitt beschreibt die Dokumentation von Verbindungen über die Erstellung von Verbindungsobjekten im CAD-System. Zur Erstellung von Verbindungsobjekten wurde eine Anwendung entwickelt, die den Benutzer bei der Verknüpfung der Produktdaten und bei der Eingabe von zusätzlichen Informationen unterstützt. Gespeichert werden die Verbindungsobjektinformationen in einer eigenen Verbindungsdatenbank. Wie bereits in Abschnitt 6.2.3 auf Seite 143 dargestellt, ist die Verbindungsdatenbank eine eigenständige Anwendung, die über den Verbindungsassistenten mit dem CAD-System kommuniziert. Die Anwendung ist in der Lage mit den geometrischen und strukturellen Informationen der Produktstruktur zu interagieren. Umgesetzt wurde der Verbindungsassistent in CATIA V5 der Firma Dassault Systèmes. Dabei wird der in Abbildung 7.5 dargestellte Ablauf zugrunde gelegt.

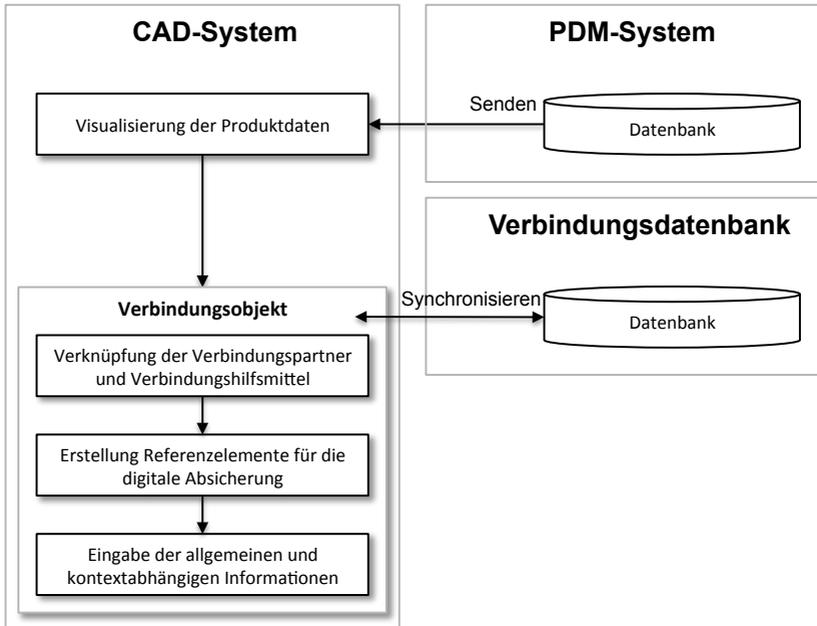


Abbildung 7.5.: Ablauf zur Erstellung von Verbindungsobjekten für eine Verbindung

### 7.2.1. Verbindungsassistent

Nach dem Laden einer Produktstruktur, können über den Verbindungsassistenten neue Verbindungsobjekte angelegt, bereits vorhandene Verbindungsobjekte bearbeitet oder gelöscht werden. Der Verbindungsassistent verwaltet dabei alle Verbindungen, die für ein Projekt definiert wurden (siehe 7.6).

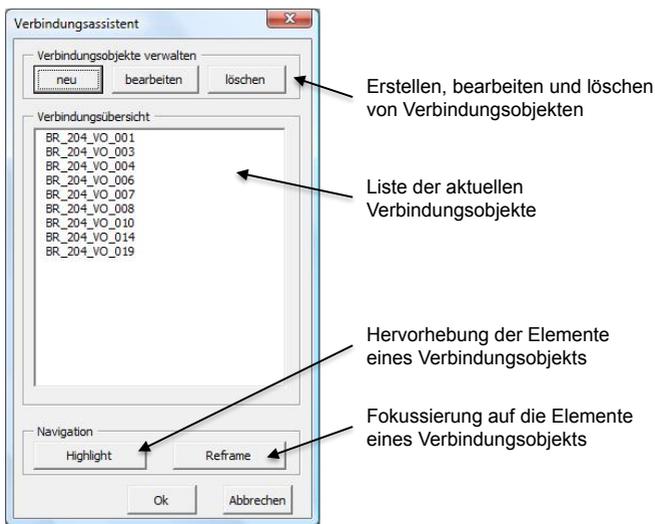


Abbildung 7.6.: Verbindungsassistent zur Verwaltung von Verbindungsobjekten

Zur besseren Sichtbarkeit der Verbindungspartner und Verbindungshilfsmittel eines Verbindungsobjekts, können diese hervorgehoben werden (Highlight). Dabei werden die Verbindungspartner und die Verbindungshilfsmittel einer Verbindung farblich hervorgehoben. Befinden sich die Bauteile nicht im Fokus der aktuellen Szene, können die Bau-

teile der Verbindung über den Befehl „Reframe“ in der Mitte des Monitors platziert werden. Diese Möglichkeit bietet sich zum Beispiel bei der Durchführung von digitalen Absicherungen an, um möglichst effektiv zwischen den zu untersuchenden Bauteilverbindungen zu wechseln.

Um die Anwendung der unterschiedlichen Werkzeuge zur Dokumentation und Absicherung von Verbindungen zu zeigen, wird die in Abbildung 7.7 gezeigte Schraubverbindung herangezogen. Diese besteht aus zwei Verbindungspartnern sowie einer einzelnen Schraube. Für diese Verbindung wird zunächst ein Verbindungsobjekt erstellt und relevante Verknüpfungen bzw. Informationen gespeichert.

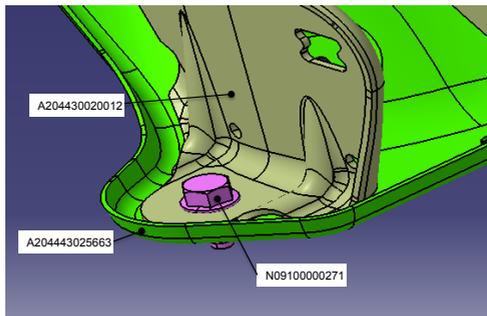


Abbildung 7.7.: Einfache Schraubverbindung mit zwei Verbindungspartnern

### 7.2.2. Verbindungsobjektdialog

Wird ein neues Verbindungsobjekt erstellt oder ein bestehendes Verbindungsobjekt bearbeitet, wechselt die Anwendung in den Bearbeitungsmodus. Hier können zunächst allgemeine Informationen, wie etwa ID,

Verbindungsart und Prozessinformationen eingegeben werden. Abbildung 7.8 zeigt den Dialog für die vorgestellte Schraubverbindung.

In diesem Dialog werden vorrangig die folgenden Tätigkeiten durchgeführt:

- Charakterisierung der Verbindung
- Verknüpfung der Verbindungspartner/-hilfsmittel
- Erstellung von Referenzelementen
- Eingabe von kontextabhängigen Informationen

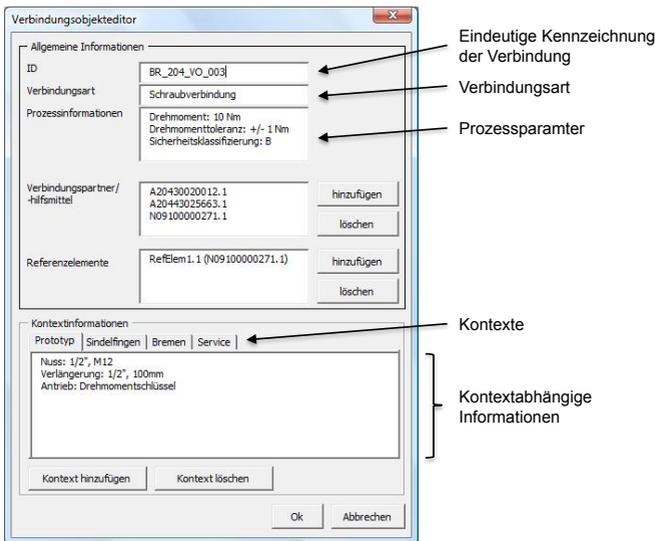


Abbildung 7.8.: Bearbeitung der Verbindungsinformationen im Verbindungsobjektor

### **Charakterisierung der Verbindung**

Eine Verbindung trägt bestimmte, allgemeingültige Merkmale, die sowohl für ihre Identifikation innerhalb des Produktes als auch zu ihrer genaueren Klassifikation beitragen. Im vorliegenden Beispiel bestehen diese Informationen aus einer eindeutigen Identifikationsnummer sowie der Beschreibung der Verbindungsart. Insbesondere die Art der Verbindung spielt für die spätere Absicherung eine zentrale Rolle, da diese festlegt, welche Arten von Werkzeugen einsetzbar sind. Darüber hinaus können noch Prozessinformationen an einem Verbindungsobjekt dokumentiert werden. Diese Daten stammen in der Regel aus Berechnungen oder Festlegungen aufgrund der Sicherheitsklassifikation einer Verbindung. Diese Informationen werden zwar nicht für eine geometrische Absicherung benötigt, müssen jedoch bei der Auswahl der Werkzeug beachtet werden, wenn beispielsweise hohe Anforderungen an die Prozesssicherheit von Montageprozessen gestellt werden. Sind Schraubverbindungen beispielsweise sicherheitskritisch, wird ihre Montage während der Serienproduktion dokumentiert. Eine solche Dokumentation wird dann über die automatisierten Steuerungssysteme der Werkzeuge durchgeführt. Daher scheidet in solchen Fällen manuelle Werkzeuge aus.

### **Verknüpfung der Verbindungspartner/-hilfsmittel**

Im zweiten Schritt werden die Verknüpfungen zu den Verbindungspartnern bzw. -hilfsmitteln hergestellt. Hierzu genügt es die beiden Bauteile und die Schraube in der 3D-Szene per Maus zu selektieren. Die Bezeichnungen der Bauteile werden daraufhin in den Dialog übernommen. Fehlerhafte Selektionen können auch wieder gelöscht werden.

### Erstellung von Referenzelementen

Die Erstellung von Referenzelementen macht sich ähnliche Algorithmen zunutze, wie sie bereits bei der Positionierung von Verbindungshilfsmitteln vorgestellt wurden. Referenzelemente lassen sich an unterschiedlichen Objekten anbringen. Dabei kann man sich die Eigenschaften von Oberflächen, Bohrungen oder anderen geometrischen Elementen zunutze machen (vgl. Abbildung 6.5 auf Seite 131). Ziel ist es, eine Lage und eine Orientierung zu dokumentieren, die später während der digitalen Absicherung als Angriffspunkt für ein Werkzeug wiederverwendet werden kann. Im Fall der vorliegenden Schraubverbindung wird das Referenzelement daher am Schraubenkopf erzeugt (siehe Abbildung 7.9).

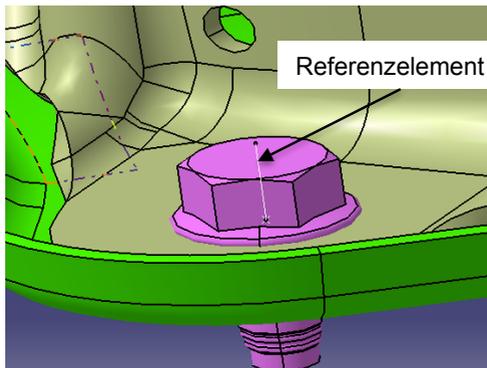


Abbildung 7.9.: Referenzelement an einer Schraubverbindung

Darüber hinaus lassen sich Referenzelemente auch für andere Arten von festen, lösbaren sowie festen, nicht-lösbaren Verbindungen anwenden (siehe Abbildung 7.10).

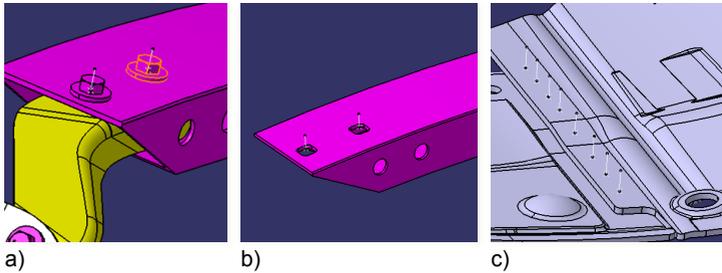


Abbildung 7.10.: Referenzelemente zur Abbildung von Verbindungen  
a) an einem Verbindungshilfsmittel (Schraube)  
b) ohne festgelegtes Verbindungshilfsmittel  
c) als Schweißnaht

Abbildung 7.10.a zeigt zwei Schrauben, die mithilfe von Referenzelementen in Simulationen genutzt werden können. In Abbildung 7.10.b wird gezeigt, dass Referenzelemente auch gesetzt werden können, ohne dass bisher ein Verbindungshilfsmittel gewählt wurde. Dies ist insbesondere in solchen Fällen interessant, wo es beispielsweise weder produkt- noch produktionsseitig Vorgaben zur Realisierung einer Verbindung gibt (Concurrent Engineering). In einer solchen Simulationsszene können unterschiedliche Werkzeugtypen für unterschiedliche Verbindungshilfsmittel simuliert werden, so dass am Ende sowohl das beste Werkzeug, wie auch das beste Verbindungshilfsmittel identifiziert werden können. Abbildung 7.10.c wiederum zeigt die Gestaltung einer Schweißnaht durch mehrere Referenzelemente, die in einer Gruppe angeordnet sind. Wird eine solche Verbindung modelliert, können mehrere Referenzelemente zu einer Gruppe zusammengefasst werden, so dass nicht für jedes Referenzelement ein eigenes Verbindungsobjekt erstellt werden muss.

Weitere Beispiele für Verbindungsarten und Referenzelemente sind in Anhang A auf Seite 199 aufgeführt. Anhang B auf Seite 203 zeigt darüber hinaus auch die Anwendung von Referenzelementen in kaskadierenden Verbindungen. D.h. Verbindungen, die aufeinander aufbauen.

Die Darstellung der Verbindungsobjekte erfolgt im Strukturbaum des CAD-Systems. Dazu wird ein temporärer Knoten erstellt. An diesem Knoten werden die Verbindungsobjekte als flache Liste angelegt, sobald der Verbindungsassistent gestartet wird und in der Verbindungsdatenbank passende Einträge zur geladenen Produktstruktur identifiziert werden.

### **Eingabe von kontextabhängigen Informationen**

Neben der Eingabe der allgemeinen Verbindungsinformationen ermöglicht der Verbindungsobjekteditor die Erstellung unterschiedlicher Kontexte. Jeder Kontext kann dabei eigene Informationen speichern. Entweder bezogen auf eine Lebensphase oder, wie in Abbildung 7.8 dargestellt, bezogen auf unterschiedliche Produktionswerke. In der aktuellen Umsetzung werden diese Informationen in Form eines Freitextes eingegeben.

Zur Durchführung kontextorientierter, digitaler Absicherungsuntersuchungen werden vorrangig Informationen über die jeweiligen x-Systeme benötigt. Wie in Abbildung 7.8 zu erkennen, können hier die aktuell gültigen Werkzeuginformationen hinterlegt werden. Besteht ein Werkzeug aus mehreren Einzelteilen, werden diese bei den Kontextinformationen angegeben. Mit Hilfe eines digitalen Werkzeugkatalogs lässt sich das vollständige Werkzeug anschließend zusammensetzen und simulieren.

Darüber hinaus erlaubt dieses Feld auch die Dokumentation des aktuellen Status (z.B. erfolgreich simuliert oder noch nicht geprüft) eines Verbindungsobjektes für den jeweiligen Kontext. Diese Information kann genutzt werden, um den Reifegrad des Produktes auch nach den einzelnen Lebensphasen aufzuschlüsseln, wodurch sich ein besseres Gesamtbild für die Produktkonstruktion und -planung ergibt.

## **7.3. Kontextorientierte Absicherung**

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Dokumentation von Verbindungsinformationen als Voraussetzung für die kontextorientierte Absicherung eingeführt. Wie in Abbildung 6.14 auf Seite 151 dargestellt, bildet der Kontext eine entscheidende Einflussgröße bei der Durchführung von digitalen Absicherungen. Dieser Abschnitt befasst sich nun mit der möglichen Verwendung von Verbindungsobjekten zur digitalen Werkzeugabsicherung von Verbindungen in unterschiedlichen Kontexten.

### **7.3.1. Klärung der Aufgabenstellung**

Zielsetzung dieser Phase ist die Ermittlung der relevanten Parameter zum Aufbau und Ablauf einer Simulation (siehe Abbildung 7.11). Die Festlegung auf eine Lebensphase gehört zu den ersten Schritten bei der Durchführung einer Simulation, da prinzipiell jede Lebensphase einen eigenen Kontext darstellen kann. Basierend auf dieser Information können alle anderen Parameter zum Aufbau und Ablauf einer digitalen Absicherung ermittelt werden. Entlang des Produktlebens werden Verbindungen mit unterschiedlichen x-Systemen bearbeitet. So erfolgt das Fügen von Bauteilen im Prototypenbau mit anderen Werkzeugen

als beispielsweise in der Serienproduktion bzw. in den unterschiedlichen Produktionswerken, falls das Produkt an mehreren Standorten gefertigt wird. Weiterhin unterscheiden sich auch die Werkzeuge und Arbeitsschritte in Werkstätten erheblich von den Werkzeugen und Arbeitsschritten in der Serienproduktion.

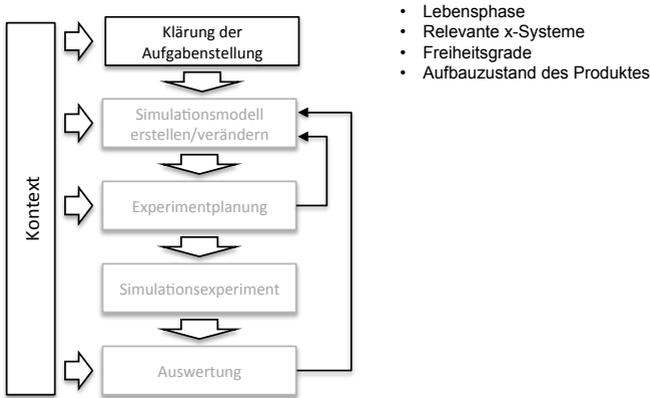


Abbildung 7.11.: Klärung der Aufgabenstellung

Abhängig vom Reifegrad des Produktes oder des jeweiligen x-Systems in den unterschiedlichen Lebensphasen können konkrete Werkzeuge oder Werkzeugklassen vorgegeben sein. Werkzeugklassen beschreiben beispielsweise automatisierte oder manuelle Werkzeuge. Während in einer Serienproduktion eher automatisierte und spezialisierte Montagesystem zum Einsatz kommen, wird in Werkstätten eher mit flexiblen Werkzeugen gearbeitet, welche aus Einzelteilen zusammengesetzt werden können (z.B. Steckschlüsselsatz).

Abbildung 7.12 zeigt die geometrischen Unterschiede der verschiedenen Werkzeugklassen anhand einiger ausgewählter Werkzeuge. Diese lassen sich mit den entsprechenden Hilfsmitteln zu unterschiedlichen Werkzeugkonfigurationen zusammensetzen. Zur Verdeutlichung der Unterschiede von Kontexten werden für die oben genannte Schraubverbindung zwei Kontexte evaluiert: Produktion und Service.

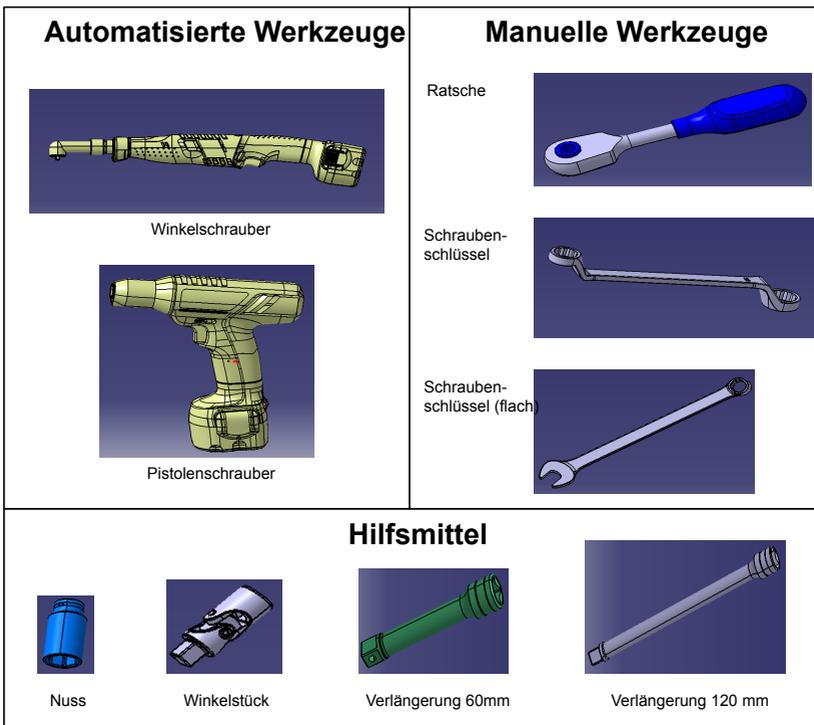


Abbildung 7.12.: Geometrien von automatisierten und manuellen Werkzeugen sowie Hilfsmittel zur Erstellung von Werkzeugkonfigurationen

Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch die eingesetzten Werkzeuge. Während in der Produktion elektrisch angetriebene Werkzeuge eingesetzt werden, wird in der Werkstatt vorrangig mit manuellen Werkzeugen gearbeitet. In Kombination mit Hilfs- bzw. Anbauteilen lassen sich manche Werkzeuge erweitern. Dies führt dazu, dass für die unterschiedlichen Antriebe (Winkel-, Pistolenschrauber und Ratsche) durch Kombination unterschiedlicher Verlängerungen oder den Einsatz von Winkelstücken unterschiedliche Konfigurationen erzeugen lassen.

<b>Kontext 1 (Produktion)</b>	<b>Kontext 2 (Service)</b>
<p><b>Werkzeuge für die Serienproduktion</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Winkelschrauber (WS)</li> <li>• Pistolenschrauber (PS)</li> </ul> <p><b>Verfügbare Hilfsmittel</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuss</li> <li>• Verlängerung 60mm (V60)</li> <li>• Verlängerung 120mm (V120)</li> </ul>	<p><b>Werkzeuge für den Service</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ratsche (R)</li> <li>• Schraubenschlüssel 1</li> <li>• Schraubenschlüssel 2</li> </ul> <p><b>Verfügbare Hilfsmittel</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuss</li> <li>• Winkelstück(W)</li> <li>• Verlängerung 60mm (V60)</li> <li>• Verlängerung 120mm (V120)</li> </ul>
<p><b>Aufgabe</b> Lässt sich der Fügeprozess für diese Verschraubung mit einem der beiden Antriebe realisieren?</p>	<p><b>Aufgabe</b> Finde ein passendes Werkzeug zum Lösen der Schraube</p>

Abbildung 7.13.: Verfügbare Werkzeuge und Aufgabenstellung zur Absicherung von zwei Kontexten

Der Aufbauzustand des Produktes ergibt sich in den meisten Fällen aus der Produktions- bzw. Reparaturplanung. Während die geplante Abfolge von Arbeitsschritten für Servicefälle in allen Werkstätten gleich bleibt, kann sich die Montagereihenfolge in den unterschiedlichen Produktionswerken aufgrund lokaler Gegebenheiten ändern. Die Erstellung und Dokumentation der jeweiligen Reihenfolgen erfolgt in den entspre-

chenden Fachabteilungen. Daher ist vor der Durchführung einer digitalen Werkzeugabsicherung einer konkreten Verbindungen zu ermitteln, in welchem Aufbauzustand sich das Produkt in der entsprechenden Lebensphase befindet. Abbildung 7.13 zeigt die Aufgabenstellung für die vorliegende Schraubverbindung.

### 7.3.2. Erstellung der Simulationsszene

Liegen nach der Klärung der Aufgabenstellung alle Informationen vor, kann mit der Erstellung der Simulationsszene begonnen werden. Abbildung 7.14 zeigt die Arbeitsschritte, die bei der Erstellung bzw. bei der Variation des Simulationsmodells durchlaufen werden.

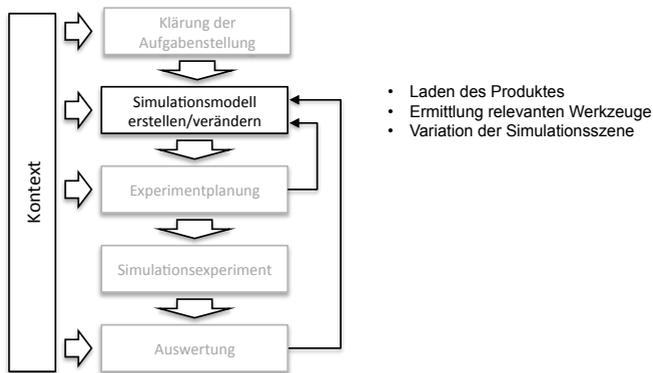


Abbildung 7.14.: Arbeitsschritte bei der Erstellung bzw. beim Variieren des Simulationsmodells

Im ersten Schritt wird zunächst das Produkt in seinem definierten Aufbauzustand geladen. Damit werden auch alle relevanten Verbindungsobjekte des Produktes geladen. Die Verbindungsobjekte bilden in der

Simulationsszene die Schnittstelle, an der das Produktdatenmodell mit dem Datenmodell des x-Systems zusammengebracht werden. Jedes Verbindungsobjekt enthält die relevanten Informationen über die Art und Ausprägung der Verbindung. Auf Basis dieser Information und der Angabe des Kontextes kann ein einzelnes Werkzeug oder eine Gruppe von Werkzeugen ermittelt werden, die für den Fügevorgang verwendet werden können.

Wird die Simulation mit mehreren Iterationen durchgeführt, können sowohl die Produktdaten als auch die Daten des x-Systems bei jedem Durchlauf variiert werden. Dies geschieht entweder durch Veränderung des Aufbauzustands des Produktes oder durch die Veränderung der zu simulierenden Werkzeugkonfigurationen. Welcher Weg gewählt wird, hängt von den in der Aufgabenstellung festgelegten Freiheitsgraden ab. Im vorliegenden Beispiel erfolgt für beide Aufgabenstellungen eine Variation der Werkzeuggeometrie.

### 7.3.3. Experimentplanung

Abhängig von der Anzahl der zu simulierenden Werkzeuge und den zur Verfügung stehenden Freiheitsgraden kann die digitale Werkzeugabsicherung entweder als manuelle oder automatisierte Simulation durchgeführt werden. Abhängig vom Kontext wird während der Experimentplanung (siehe Abbildung 7.15) über die weitere Vorgehensweise entschieden.

Eine manuelle Simulation wird in Situationen angewendet, in denen bereits ein konkretes x-System bekannt ist. Hier bietet die manuelle Manipulation der Lage und Drehung des Werkzeugs eine gute Möglichkeit, Einzelteile zu identifizieren, die Kollisionen hervorrufen, so dass hierauf

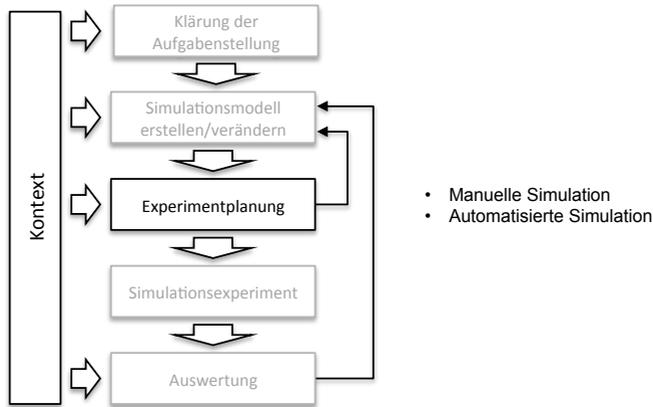


Abbildung 7.15.: Planung der Simulation als manuelle oder automatisierte Simulation

konkrete Maßnahmen zur Veränderungen des Produktes oder der Aufbaureihenfolge abgeleitet werden können. Automatisierte Simulationen bieten sich insbesondere in den Fällen an, bei denen noch kein konkretes x-System bekannt ist. So kann über eine solche Simulation beispielsweise ermittelt werden, ob es ein Werkzeug gibt, mit dem alle gleichartigen Verbindungen innerhalb einer Montagestation gefügt werden können. Damit können in einer Serienproduktion nicht nur Werkzeuge eingespart werden, sondern auch Werkzeugwechsel vermieden werden. Sollen in einer Simulation mehrere Werkzeuge bzw. Werkzeugkonfigurationen untersucht, sollten diese vorab definiert werden. Dabei werden nun die einzelnen Werkzeugkonfigurationen zusammengestellt, so dass diese in eine Simulation verwendet werden können. Abbildung 7.16 gibt einen Überblick über die möglichen Werkzeugkonfigurationen. Dabei führt insbesondere die Kombinationsvielfalt mit Verlängerungen und anderen Zwischenelementen dazu, dass für den Servicefall nahezu unendlich

viele Möglichkeiten bestehen. Ist die Menge der Kombinationen wie in Kontext 1 (Produktion) überschaubar, können alle Werkzeugkonfigurationen in einem Simulationslauf evaluiert werden. Wird die Vielfalt allerdings zu groß, wie in Kontext 2 (Service), sollte nur eine sinnvolle Untermenge gewählt und simuliert werden.

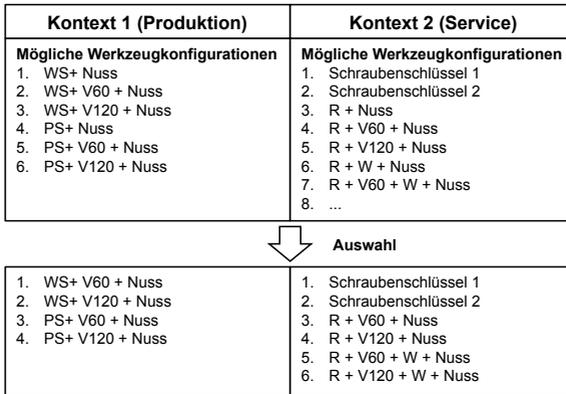


Abbildung 7.16.: Kombinationsvielfalt bei der Erstellung von Werkzeugkonfigurationen

### 7.3.4. Simulationsexperiment

Nach der Erstellung der Simulationsszene und der Festlegung des Modus kann mit dem Ablauf der Simulation begonnen werden. Konkret gehört zu dieser Phase die Durchführung der Simulation und die Visualisierung der Simulationsergebnisse (siehe Abbildung 7.17). Bei der manuellen Simulation erfolgt die Kollisionsprüfung zwischen x-System und Produkt durch manuelle Manipulation der Lage und Ausrichtung des Werkzeugs innerhalb der Simulationsszene. Die Anzeige von Koll-

sionen kann beispielsweise über Hervorhebung der betroffenen Komponenten dargestellt werden (siehe Abbildung 4.6 auf Seite 101).

Im Gegensatz dazu kann bei einer automatisierten Simulation eine Gruppe von Werkzeugen an einem oder mehreren Verbindungsobjekten positioniert und auf Kollisionen geprüft werden. Da bei einer automatisierten Simulation mehr Informationen parallel ausgewertet werden, erfolgt die Darstellung der Ergebnisse nicht durch Hervorhebung, sondern über Kuchendiagramme oder in Form einer Matrix. Eine Matrix gibt eine Übersicht über alle Kombinationsmöglichkeiten aus gewählten Verbindungen und Werkzeugen (siehe Abbildung 4.8 auf Seite 103).

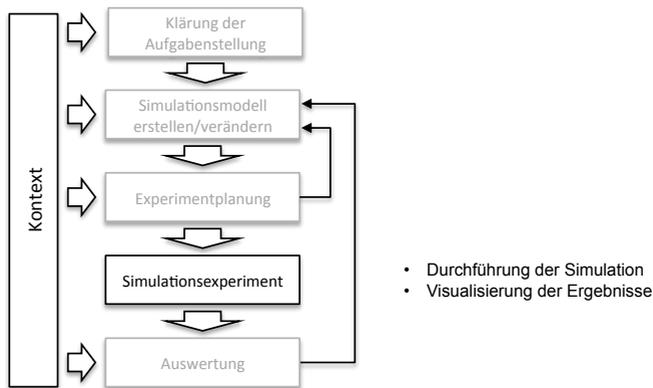


Abbildung 7.17.: Durchführung der Simulation und Visualisierung der Ergebnisse

### 7.3.5. Auswertung

In der Phase der Auswertung werden die aktuellen Simulationsergebnisse gesichtet und die nächsten Schritte festgelegt (siehe Abbildung 7.18).

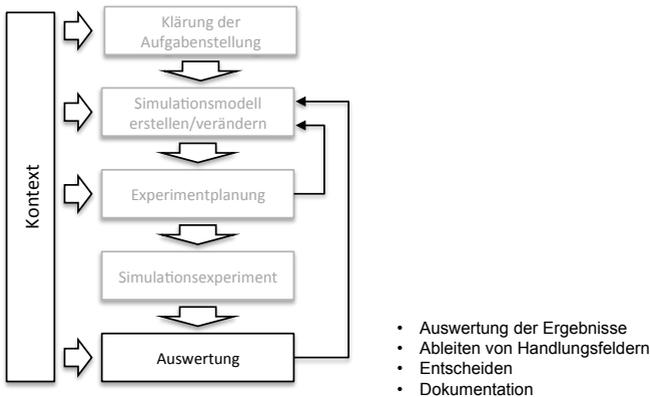


Abbildung 7.18.: Auswertung der Simulationsergebnisse und Festlegung der nächsten Schritte

Abhängig von den zur Verfügung stehenden Freiheitsgraden ergeben sich unterschiedliche Handlungsfelder bei der Lösung von Konflikten zwischen Produkt und x-System. Solange es sich nicht um konstruktive Änderungen an Einzelteilen handelt, kann durch Variation des Produktes oder des x-Systems die Simulation erneut durchlaufen werden. Stehen diese Freiheitsgrade nicht mehr zur Verfügung, muss eine Entscheidung getroffen werden, ob das Produkt oder das x-System verändert werden muss. Wurde die Entscheidung getroffen, muss diese in einer reproduzierbaren Form dokumentiert werden. An dieser Stelle bieten sich die kontextabhängigen Informationen am Verbindungsobjekt an. Hier

können nun aufgrund des gewählten Kontextes zusätzlich die getroffenen Entscheidungen dokumentiert werden. Nach erfolgter Änderung des Produktes oder des x-Systems kann die Simulationsszene auf Basis der dokumentierten Informationen erneut aufgebaut und abgesichert werden.

Für das Beispiel der Schraubverbindung bedeutet das, dass nicht alle Werkzeugkonfigurationen verwendet werden können (Abbildung 7.19). Allerdings bleiben genügend Werkzeugkonfigurationen übrig, so dass keine erneute Simulation notwendig ist.

Kontext 1 (Produktion)	Kontext 2 (Service)
1. <del>WS+V60+Nuss</del>	1. Schraubenschlüssel 1
2. WS+V120+Nuss	2. Schraubenschlüssel 2
3. <del>PS+V60+Nuss</del>	3. <del>R+V60+Nuss</del>
4. <del>PS+V120+Nuss</del>	4. <del>R+V120+Nuss</del>
	5. R+V60+W+Nuss
	6. R+V120+W+Nuss

Abbildung 7.19.: Reduzierung der möglichen Werkzeugkonfigurationen auf diejenigen, die eine kollisionsfreie Montage bzw. Demontage ermöglichen

Die verbleibenden Werkzeugkonfigurationen können nun als Ergebnis in den jeweiligen Kontexten der Schraubverbindung dokumentiert werden. Damit lassen sich diese Informationen zu einem späteren Zeitpunkt erneut aufrufen, falls sich etwas am Produkt geändert hat und eine erneute Simulation eines Kontextes als notwendig erweist.

## 7.4. Kritische Bewertung

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Bewertung des vorgestellten Konzepts. Die Bewertung orientiert sich an den identifizierten Handlungsfeldern aus Kapitel 5.

### 7.4.1. Dokumentation von festen Verbindungen

Wie in Kapitel 4 dargestellt, unterscheiden sich die Dokumentationsmethoden für feste Verbindungen in vielerlei Hinsicht. Auf der einen Seite werden feste nicht-lösbare Verbindungen mit Hilfe von expliziten Features in CAD-Systemen modelliert. Diese Features können zusätzlich mit Informationen angereichert werden, so dass sowohl Prozessinformationen als auch Informationen zur Durchführung von Simulationen in den CAD-Daten vorhanden sind. Auf der anderen Seite werden feste lösbare Verbindungen eher implizit dokumentiert. In der Regel werden die zu verbindenden Einzelteile sowie die notwendigen Verbindungshilfsmittel lediglich im Kontext des Produktes positioniert. Zusätzliche Informationen können an diesen Bauteilen nicht hinterlegt werden.

Das vorgestellte Konzept kombiniert diese beiden Ansätze, indem sowohl feste lösbare als auch feste nicht-lösbare Verbindungen mit einer einheitlichen Methodik dokumentiert und mit zusätzlichen Informationen angereichert werden. Durch die vorgestellte Dokumentation ergeben sich gleich mehrere Vorteile im Produktentstehungsprozess. Zum Einen werden durch einen einheitlichen Ansatz nicht mehrere, verschiedene Ansätze entwickelt, die im Prozess implementiert werden müssen. Zum Anderen lässt sich die Komplexität der Systemlandschaft reduzieren, indem nur eine Schnittstelle und eine Methodik gepflegt und

weiterentwickelt werden muss. Damit wird nicht nur die Anzahl der potentiell unterschiedlichen Dokumentationsansätze reduziert, sondern auch Transparenz geschaffen, indem Verbindungsinformationen in einer gleichen Art und Weise im Produktentstehungsprozess zur Verfügung gestellt werden.

Durch den einheitlichen Dokumentationsansatz werden alle festen Verbindungen gleichrangig behandelt. Daraus ergeben sich insbesondere in den frühen Phasen der Produktentwicklung Vorteile. So lässt sich durch frühzeitige Absicherungsuntersuchungen vor allem die Anzahl der notwendigen physikalischen Prototypen reduzieren. Bisher fehlten die notwendigen Informationen an festen Verbindungen, um diese Absicherungsuntersuchungen effizient durchführen zu können. Durch die Integration von Referenzelementen in Verbindungsobjekten lassen sich nun alle Verbindungen direkt in digitalen Absicherungen verwenden.

Auch wenn sich durch eine einheitliche Dokumentationsmethode eindeutig Vorteile im Gesamtprozess erschließen lassen, gestaltet sich die Integration einer solchen Methode in ein existierenden Systemverbund äußerst schwierig. Die Herausforderungen ergeben sich insbesondere aus der tiefen Integration der existierenden Dokumentationsmethode für feste nicht-lösbare Verbindungen in den Folgeprozessen des Unternehmens.

### **7.4.2. Erhöhung der Datenqualität**

Die Bereitstellung von Produkt- und Prozessinformationen bereits zu Beginn der Produktentstehung ermöglicht die frühzeitige Identifikation von Problemen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Reifegrad der vorhandenen Daten in den frühen Phasen noch nicht dem endgültigen

Entwicklungsstand eines fertigen Produktes entspricht. Jedoch können die dokumentierten Verbindungsinformationen bereits für einfache Absicherungsuntersuchungen herangezogen werden. Denn selbst durch einfache Zugänglichkeitsuntersuchungen auf der Basis unvollständiger Daten lassen sich bereits frühzeitig Probleme identifizieren. Erst zu einem späteren Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess werden genauere Ergebnisse erwartet. Ein weiterer Vorteil der vorgestellten Dokumentation besteht in der Anreicherung von Verbindungen mit Referenzelementen. Diese beschleunigen den Prozess der Simulationsvorbereitung erheblich. Referenzelemente bilden nicht nur die Verknüpfung von Produkt und den jeweiligen x-Systemen ab, sondern dienen auch der schnellen Positionierung von Werkzeugen in Simulationsmodellen.

Parallel zu den Vorteilen der Informationsbereitstellung muss aber auch erwähnt werden, dass die korrekte Positionierung aller Bauteile, d.h. sowohl der Verbindungspartner als auch der Verbindungshilfsmittel von essentieller Bedeutung ist. Ohne die korrekte Positionierung aller Bauteile lässt sich auch keine eindeutige Aussage über den Reifegrad des Gesamtsystems treffen. Um dies zu ermöglichen wurden daher Hilfsmittel zur Positionierung entwickelt und im vorhandenen CAD-System implementiert. Dadurch kann der Konstrukteur schneller auf geänderte Lagen der vorhandenen Bauteile in einem Produkt reagieren und erhöht somit ebenfalls die Qualität der Produktdaten. Allerdings muss auch in der Organisation ein Verständnis dafür geschaffen werden, dass diese Hilfsmittel bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung angewendet werden müssen, um auch auf Basis unvollständiger Informationen Absicherungsuntersuchungen durchführen zu können. Neben den funktionalen Unterstützungen im CAD-System wird die Qualität der Produktdaten auch von den Vorgaben im Produktentstehungsprozess beeinflusst. Methodisch können dem Anwender lediglich Hilfsmittel zur

Positionierung und Dokumentation an die Hand gegeben werden. Die Anwendung dieser Hilfsmittel muss jedoch auch durch Vorgaben hinsichtlich der erwarteten Produktqualität im Produktentstehungsprozess unterstützt werden. Solche Vorgaben können sich einerseits darin äußern, dass Einzelteilgeometrie auch unvollständig veröffentlicht werden, also nicht erst wenn der Konstrukteur sein fertiges Design freigeben möchte. Auf der anderen Seite gehören in diese Kategorie auch eindeutige Vorgaben bzgl. der korrekten Positionierung aller Einzelteile und Baugruppen, also auch von Verbindungshilfsmitteln, die bisher eher stiefmütterlich behandelt werden. Die Möglichkeit der unmittelbaren Verwendung von Verbindungen nach dem hier vorgeschlagenen Konzept schafft somit auch eine gewisse Transparenz hinsichtlich fehlerhaft positionierte Bauteile, da diese in digitalen Absicherungsuntersuchungen als Problemstellen identifiziert werden.

### **7.4.3. Unterstützung der kontextorientierten, digitalen Absicherung**

Die Grundlage zur Durchführung von digitalen Absicherungen ist eine entsprechende Qualität der vorhandenen Produktdaten sowie entsprechende Möglichkeiten in einem Simulationssystem. Darüber hinaus werden für digitale Absicherungsuntersuchungen auch Informationen über den Kontext der jeweiligen Absicherung benötigt. Das vorgestellte Konzept bringt genau diese Informationen in Form von Verbindungsobjekten zusammen und ermöglicht damit eine effiziente und frühzeitige Absicherung von Produkten und x-Systemen.

Verglichen mit der manuellen Erstellung von Simulationsmodellen beschleunigt die Integration von Verbindungsobjekten die Modellerstel-

lung und -absicherung. Verbindungsobjekte dienen dabei sowohl zur Identifikation von Verbindungen und deren physikalischen Eigenschaften als auch zur schnellen Positionierung von Simulationsmodellen von Werkzeugen mit Hilfe der eingebrachten Referenzelemente. Die physikalischen und prozessualen Eigenschaften von Verbindungsobjekten können unmittelbar zur Identifikation der Parameter zum Aufbau von Werkzeugen genutzt werden.

Um Werkzeuggeometrien effizient erstellen zu können, wurde ein Werkzeugkatalog eingeführt, in dem die Einzelteile der Werkzeuge aufbereitet und konzernweit zur Verfügung gestellt werden. Durch die Aufbereitung der Werkzeuge erhalten diese ebenfalls Referenzelemente, mit denen der Aufbau zusammengesetzter Werkzeuge automatisiert werden kann. Darüber hinaus werden auch die Meta-Informationen der einzelnen Werkzeugteile in diesem Katalog erfasst, so dass auch logische Abhängigkeiten zwischen den Werkzeugteilen genutzt werden. Im Gegensatz zum früheren Prozess müssen neue Werkzeug Einzelteile damit nur noch einmal zentral aufbereitet werden und nicht in jedem Fachbereich separat. Zusätzlich führte die zentrale Erstellung zu einer Konsolidierung der vorhandenen Werkzeuge, wodurch die Standardisierung in einem gewissen Maß vorangebracht werden konnte.

Die vorliegende Arbeit zeigt, wie durch eine einheitliche Dokumentation von Verbindungen auch eine Vereinheitlichung der existierenden Absicherungsaktivitäten erreicht wird. Dadurch kann auch die Anzahl der unterschiedlichen Simulationsmodelle reduziert und die Dokumentation der kontextabhängigen Reifegrade zentralisiert werden. Durch die Dokumentation der unterschiedlichen Kontexte an einem Verbindungsobjekt stehen diese Informationen in allen Fachbereichen zur Verfügung und erhöhen die Transparenz, da auch Entscheidungen

über Änderungen unmittelbar an Verbindungen dokumentiert werden können. Da es bereits heute schon unterschiedliche Absicherungsmethoden in den Bereichen Karosserierohbau und Endmontage gibt, kann ein Wechsel auf eine neue Methode nur langsam erfolgen. Grundlage für die vollständige Implementierung ist dabei die Dokumentation von Verbindungen. Erst diese ermöglicht die Verwendung gleicher Simulationsansätze in den unterschiedlichen Fachbereichen.

#### **7.4.4. Datenbereitstellung im Produktentstehungsprozess**

Das Konzept zur Dokumentation von Verbindungen sieht die Verwaltung von Verbindungsinformationen in einer eigenen Verbindungsdatenbank vor. Diese Art der Datenhaltung und -bereitstellung wurde primär deshalb gewählt, um das CAD-Modell des Produktes nicht zu überfrachten. Geometrisch relevante Elemente, wie etwa Verbindungshilfsmittel befinden sich sowieso in der Produktstruktur und werden immer über das PDM-System zum CAD-System versorgt. Zusätzliche Verbindungsinformationen lassen sich nun aber bedarfsorientiert zu steuern oder ausblenden, indem über den vorgestellten Verbindungsassistent auf die Verbindungsdatenbank zugegriffen wird. Außerdem ermöglicht die parallele Dokumentation von Verbindungsobjekten auch die Handhabung unterschiedlicher Produktvarianten, welche bei einer reinen Dokumentation in den CAD-Daten, also auf Einzelteil- oder Zusammenbauebene, nicht möglich ist.

Dennoch führt die dargestellte Dokumentationsmethodik auch zu einer gewissen Erhöhung der Komplexität der vorhandenen Systemlandschaft, da eine weitere Schnittstelle und eine weitere Datenbank implementiert wurden. Prinzipiell könnten Verbindungsobjekte im PDM-

System verwaltet werden. Aufgrund der notwendigen Änderungen für eine solche Implementierung im existierenden PDM-System und in der Schnittstelle zum CAD-System des betrachteten Unternehmens, wurde für die prototypische Implementierung ein anderer Weg gewählt. Langfristig muss die Archivierung von Verbindungsobjekten in das PDM-System gebracht werden. Damit werden nicht nur alle Produktdaten konsistent in einem Daten-Backbone verwaltet, sondern auch kontrolliert. Außerdem verfügen PDM-Systeme über weitere Funktionalität, wie etwa Versionierung oder Freigabemechanismen, die in einem interdisziplinären Produktentwicklungsprozess eine große Rolle spielen und auch für Verbindungsobjekte Anwendung finden sollten.

### 7.5. Fazit

In diesem Kapitel wurde die prototypische Implementierung der Dokumentation von Verbindungsobjekten vorgestellt. Verbindungsobjekte dienen dabei als Container zur Dokumentation kontextabhängiger Informationen im Produktentstehungsprozess. Zusätzlich beschränkt sich die Dokumentation von Verbindungen nicht nur auf einzelne Verbindungsarten, sondern ermöglicht die Erstellung und Verwaltung jeglicher fester, lösbaren und fester, nicht-lösbaren Verbindungen. Zusammen mit Methoden zur schnelleren Positionierung von Kleinteilen lässt sich die Datenqualität in den frühen Phasen der Produktentwicklung deutlich erhöhen.

Darüber hinaus bilden Verbindungsobjekte die Grundlage zur kontextorientierten Absicherung von Verbindungen. Die jeweiligen Kontexte und deren Randbedingungen lassen sich auf Verbindungsobjekten dokumentieren und während einer digitalen Absicherung wieder-

verwenden. Die Einführung von Verbindungsobjekten schließt somit den Kreis von der Informationsbereitstellung für digitale Absicherungsuntersuchungen bis hin zur Dokumentation von Entscheidungen und Änderungsbedarfen. Durch diese Art der Dokumentation von digitalen Absicherungsuntersuchungen werden diese nicht nur reproduzierbar, sondern es lässt sich die Transparenz im gesamten Produktentstehungsprozess erhöhen, da diese kontextabhängigen Informationen allen Beteiligten zur Verfügung stehen.



## **8. Zusammenfassung und Ausblick**

Dieses Kapitel fasst noch einmal die wesentlichen Erkenntnisse und Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Forschungsmöglichkeiten.

### **8.1. Zusammenfassung**

Technische Produkte sind aus einer Vielzahl von Einzelteilen und Baugruppen zusammengesetzt. Um deren funktionalen Beziehungen zwischen den Einzelteilen und Baugruppen herstellen und gewährleisten zu können, werden diese durch Verbindungen zusammengebracht. Diese spielen in nahezu allen Lebensphasen des Produktes eine wichtige Rolle. Die Analyse dieser Arbeit beschäftigte sich daher mit der Frage, wie Verbindungen und ihre Eigenschaften in der Wissenschaft und in der Praxis behandelt werden. Dabei wurde der Fokus insbesondere auf die digitale Absicherung von Produkt und den unterschiedlichen x-Systemen im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie gelegt.

Dabei hat sich herausgestellt, dass nicht alle Verbindungsarten gleich behandelt werden. Während feste nicht-lösbare Verbindungen, wie etwa Schweiß- oder Klebeverbindungen, mit ihren Prozessinformationen im Produktdatenmodell abgebildet werden, werden feste lösbare Ver-

bindungen (z.B. Schraubverbindungen) nachrangig behandelt. Dies gilt sowohl für die Qualität der CAD-Modelle als auch deren Wiederverwendung in Simulationen. Aus diesen Gründen wurden in dieser Arbeit Konzepte entwickelt, welche die Datenqualität der CAD-Modelle frühzeitig erhöhen und Verbindungsinformationen digitalen Absicherungsuntersuchungen zugänglich machen.

Dazu gehört eine neue Art der Dokumentation von festen Verbindungen, basierend auf Verbindungsobjekten. Diese Objekte zielen darauf ab, die Qualität der vorhandenen Produktdaten zu erhöhen und bildet die Voraussetzungen für die digitale Absicherung im Produktentstehungsprozess. Verbindungsobjekte tragen alle relevanten Informationen einer Verbindung (z.B. Prozessinformationen, Charakteristik der Verbindung etc.). Während manche Informationen allgemein für eine Verbindung gelten, verändern sich andere Informationen, abhängig davon welcher Kontext betrachtet wird. Aus diesem Grund werden die dokumentierten Informationen in allgemeingültige und kontextabhängige Informationen unterteilt.

Aufgrund der hohen Dynamik in den frühen Phasen der Produktentstehung fokussieren sich Konstrukteure auf die Entwicklung von Bauteilen und Baugruppen, während die korrekte Lage und Orientierung von Verbindungshilfsmitteln vernachlässigt wird. Mit zunehmender Bedeutung der digitalen Absicherung in den frühen Phasen der Produktentwicklung wird allerdings eine korrekte Positionierung aller Bauteile notwendig. Aus diesem Grund wurden Algorithmen entwickelt, die den Konstrukteuren die Neu- und Änderungspositionierung von Kleinteilen erleichtern. Das primäre Ziel der Erhöhung der Datenqualität und der Vereinheitlichung der Dokumentation von Verbindungen ist schließlich der verstärkte Einsatz von Simulationen zur digitalen Absicherung

kontextorientierter Sachverhalte. Aus diesem Grund werden in Verbindungsobjekten Informationen zu den unterschiedlichen Kontexten bzw. Lebensphasen gespeichert und dem Konstrukteur während der digitalen Absicherung zur Verfügung gestellt. Zusätzlich werden Verbindungsobjekte mit Referenzelementen versehen. Diese dienen als Angriffspunkte für Werkzeuge während der digitalen Absicherung. Dadurch lässt sich der Aufwand für die Vorbereitung und Durchführung von digitalen Absicherungen erheblich reduzieren.

## **8.2. Ausblick**

Ausgehend von den hier erarbeiteten Ergebnissen können die vorhandenen Methoden und Werkzeuge noch weiter entwickelt werden. Die Dokumentation von Verbindungen mit Hilfe von Verbindungsobjekten wurde lediglich als Prototyp aufgebaut, welcher die Machbarkeit nachweist. Für eine produktive Nutzung dieser Funktionalität müsste diese Dokumentationsmethodik langfristig in ein PDM-System integriert werden. Dies hätte den Vorteil, dass die vorhandenen Möglichkeiten für Versions- und Variantenmanagement auch auf diese Verbindungsobjekte angewendet werden können. Damit könnte auch eine Freigabe von Verbindungsstrukturen durchgeführt werden. Außerdem verfügen PDM-Systeme über die notwendigen Schnittstellen, mit denen Informationen entlang des Produktentstehungsprozesses zielgerichtet verteilt werden, so dass Verbindungsinformationen prozessübergreifend zur Verfügung gestellt werden können.

Die Algorithmen zur Positionierung wurden primär mit dem Ziel entwickelt Kleinteile, die sehr oft in einem Produkt vorkommen effizient zu positionieren. Auch wenn die Algorithmen für Erstpositionierung

gen ebenso gut wie für Positioniervorgänge nach Änderungen funktionieren, können im zweiten Fall weitere Gesetzmäßigkeiten genutzt werden, um auch Änderungspositionierungen noch effizienter durchzuführen. Beispielsweise erfolgt die erneute Positionierung von Kleinteilen häufig nach der Verschiebung größerer Komponenten oder Baugruppen. Dass bedeutet, dass die Kleinteile ihre relative Position zueinander nicht verändern. Wird also ein Steuergerät oder ein Airbag innerhalb eines Fahrzeugs verschoben, müssen auch alle mit diesen Bauteilen verbundenen Verbindungselemente die gleiche Verschiebung erfahren.

Zur Darstellung der kontextorientierten Produktabsicherung wurde die digitale Werkzeugabsicherung entwickelt. Deren Fokus liegt momentan auf der Absicherung von Schraubenverbindungen. Durch den entwickelten Konfigurator können sowohl automatisierte als auch manuelle Werkzeuge konfiguriert, zusammengebaut und simuliert werden. Ähnliche Simulationen werden auch für Schweiß- oder Klebeverbindungen benötigt. Daher kann das existierende Konfigurations- und Simulationswerkzeug auch für weitere Verbindungs- und Werkzeugarten erweitert werden. Dies setzt allerdings voraus, dass auch diese Verbindungsarten ordnungsgemäß dokumentiert bzw. mit den entsprechenden Referenzelementen für die Simulation ausgestattet werden.

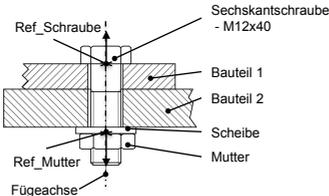
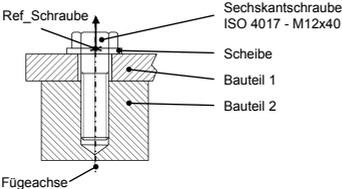
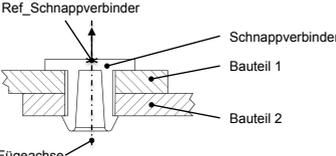
Innerhalb des betrachteten Unternehmens erfolgte der Einsatz der vorgestellten Werkzeuge primär in einem Geschäftsbereich. Hier führte die Erstellung eines einheitlichen Werkzeugkatalogs zu einer Reduzierung der unterschiedlichen Werkzeugmodelle, die in den unterschiedlichen Fachbereichen vorhanden waren. Damit war nicht nur eine Reduzierung der Aufwände für Pflege der Daten verbunden (z.B. Aktualisieren der Werkzeuge), sondern es wurden auch Werkzeuge entfernt, die nicht mehr eingesetzt werden sollten. Dieser Standardisierungseffekt kann

noch verstärkt werden, indem auch andere Geschäftsbereiche Zugriff auf die gleichen Daten erhalten und ihrerseits Werkzeuge zum Katalog beisteuern.

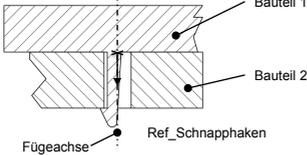
Die vorgestellten Werkzeuge wurden auf Basis eines CAD-Systems entwickelt. Prinzipiell handelt es sich bei den beschriebenen Tätigkeiten jedoch nicht um konstruktive Tätigkeiten in dem Sinne, dass Flächen oder Volumen modelliert werden. Die Positionierwerkzeuge verändern lediglich die Transformationsmatrizen der einzelnen Bauteile. Auch bei der digitale Werkzeugabsicherung werden lediglich Einzelteile aneinander ausgerichtet und im Raum bewegt. Die Bauteile selbst werden nicht verändert. Daher können diese Tätigkeiten auch von einem Viewer übernommen werden, also einer Software, die auf die Visualisierung von 3D-Geometrien spezialisiert ist. Diese Programme bringen heute schon eine Vielzahl von Funktionen mit, mit denen die beschriebenen Aufgaben ebenfalls erfüllt werden können. Dadurch kann vollständig auf native Datenformate verzichtet werden, was einerseits zu einer Erhöhung der Performance der Visualisierung beiträgt und andererseits zu einer Reduktion der Lizenzkosten beiträgt, da Viewer um eine vielfaches günstiger sind als CAD-Systeme.

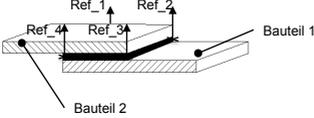
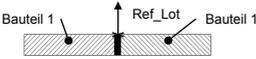


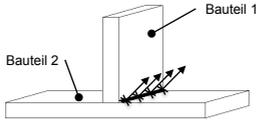
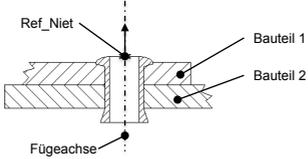
# A. Beispiele für einfache Verbindungsarten

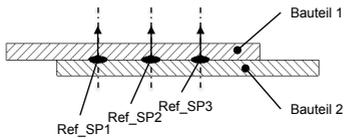
Feste, lösbare Verbindungen mit Zusatzteil/-stoff	
<p><b>Schraubverbindung (differenzierte Bauweise)</b></p> 	<p><b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteil 1</li> <li>• Bauteil 2</li> </ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sechskantschraube - M12x40</li> <li>• Mutter</li> <li>• Scheibe</li> </ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ref_Schraube</li> <li>• Ref_Mutter</li> </ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Manueller Schraubenschlüssel</li> <li>• Drehmomentschlüssel</li> <li>• Steckschlüsselsatz</li> </ul>
<p><b>Schraubverbindung (integrierte Bauweise)</b></p> 	<p><b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteil 1</li> <li>• Bauteil 2</li> </ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sechskantschraube - M12x40</li> <li>• Scheibe</li> </ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ref_Schraube</li> </ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Manueller Schraubenschlüssel</li> <li>• Drehmomentschlüssel</li> <li>• Steckschlüsselsatz</li> </ul>
<p><b>Schnappverbindung (differenzierte Bauweise)</b></p> 	<p><b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteil 1</li> <li>• Bauteil 2</li> </ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schnappverbinder</li> </ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ref_Schnappverbinder</li> </ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Per Hand</li> <li>• Spezialwerkzeug</li> </ul>

## A. Beispiele für einfache Verbindungsarten

Feste, lösbare Verbindungen ohne Zusatzteil/-stoff	
<p><b>Schnappverbindung (integrierte Bauweise)</b></p> 	<p><b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteil 1</li> <li>• Bauteil 2</li> </ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schnappverbinder</li> </ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ref_Schnapphaken</li> </ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Per Hand</li> <li>• Spezialwerkzeug</li> </ul>

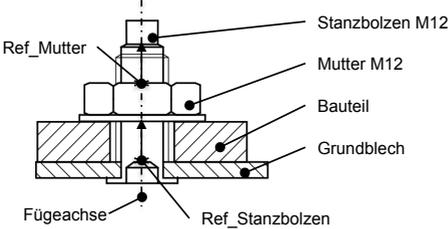
Feste, nicht-lösbare Verbindungen mit Zusatzteil/-stoff	
<p><b>Klebeverbindung</b></p> 	<p><b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteil 1</li> <li>• Bauteil 2</li> </ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Klebstoff</li> </ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gruppe (Ref_1, Ref_2, Ref_3, Ref_4)</li> </ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Per Hand (z.B. Klebepistole)</li> <li>• Kleberoboter</li> </ul>
<p><b>Lötverbindung (z.B. Stumpfstoß)</b></p> 	<p><b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteil 1</li> <li>• Bauteil 2</li> </ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lötzinn</li> </ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ref_Lot</li> </ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Per Hand (z.B. Lötpistole)</li> <li>• Lötroboter</li> </ul>

<p><b>Schweißverbindung (z.B. Kehlnaht)</b></p> 	<p><b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteil 1</li> <li>• Bauteil 2</li> </ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schweißdraht</li> </ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gruppe (Ref_1, Ref_2, Ref_3, Ref_4)</li> </ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Handschweißgerät</li> </ul>
<p><b>Blindniet</b></p> 	<p><b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteil 1</li> <li>• Bauteil 2</li> </ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Blindniet</li> </ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ref_Niet</li> </ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nietzange</li> <li>• Nietautomat</li> </ul>

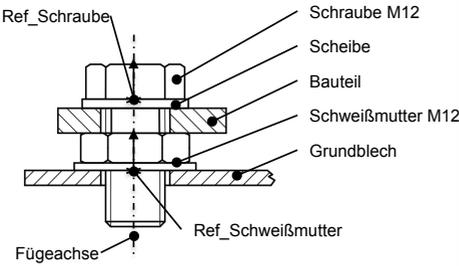
<p><b>Feste, nicht-lösbare Verbindungen mit Zusatzteil/-stoff</b></p>	
<p><b>Punktschweißverbindung</b></p> 	<p><b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteil 1</li> <li>• Bauteil 2</li> </ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ref_SP1</li> <li>• Ref_SP2</li> <li>• Ref_SP3</li> </ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schweißzange</li> </ul>



## B. Beispiele für kombinierte Verbindungen

<p><b>Kombinierte Verbindung:</b> 1. Stanzverbindung 2. Schraubverbindung</p>  <p>Stanzbolzen M12 Mutter M12 Bauteil Grundblech Fügeachse Ref_Mutter Ref_Stanzbolzen</p>	<p><b>Verbindung 1</b> <b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Grundblech</li></ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Stanzbolzen M12</li></ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Ref_Stanzbolzen</li></ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Nietzange</li><li>• Nietautomat</li></ul> <p><b>Verbindung 2</b> <b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Grundblech</li><li>• Bauteil</li></ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Stanzbolzen M12</li><li>• Mutter M12</li></ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Ref_Mutter</li></ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Schraubenschlüssel</li><li>• Steckschlüssel</li></ul>
---	---

## B. Beispiele für kombinierte Verbindungen

<p><b>Kombinierte Verbindung:</b> 1. Schweißverbindung 2. Schraubverbindung</p>  <p>Labels in the diagram: Ref_Schraube Schraube M12 Scheibe Bauteil Schweißmutter M12 Grundblech Ref_Schweißmutter Fügeachse</p>	<p><b>Verbindung 1</b> <b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Grundblech</li></ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Schweißmutter M12</li></ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Ref_Schweißmutter</li></ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Schweißzange</li></ul> <p><b>Verbindung 2</b> <b>Verbindungspartner:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Grundblech</li><li>• Bauteil</li></ul> <p><b>Verbindungshilfsmittel/-stoffe:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Schraube M12</li><li>• Schweißmutter M12</li><li>• Scheibe</li></ul> <p><b>Referenzelemente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Ref_Schraube</li></ul> <p><b>X-System Beispiele:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Schraubenschlüssel</li><li>• Steckschlüssel</li></ul>
--	--

## Literaturverzeichnis

- [AKPFN] ANDREASEN, M. M. ; KVIST, M. ; PEDERSEN, R. ; FIIL-NIELSEN: What happend to DFM? - 17 Years of DFX-Symposia. In: *17. Symposium „Design for X“*, S. 1–14
- [And87] ANDREASEN, M. M.: *Integrated Product Development*. Berlin : Springer Verlag, 1987
- [And08] ANDERSON, D. M.: *Design for Manufacturability and Concurrent Engineering*. Cambria, California : CIM Press, 2008
- [AOK80] AKAGI, F. ; OSAKI, H. ; KIKUCHI, S.: The Method of Analysis of Assembly Work Based on the Fastener Method. In: *JSME 23* (1980), S. 1670–1675
- [Bär08] BÄR, T.: Flexibility Demands on Automotive Production and their Effects on Virtual Production Planning. In: *2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS 2008)*, 2008, S. 16–28
- [Bau91] BAUER, C.-O.: *Handbuch der Verbindungstechnik*. München : Hanser Verlag, 1991
- [BC09] BLESSING, L. ; CHAKRABARTI, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. London : Springer Verlag, 2009

- [BDK02] BOOTHROYD, G. ; DEWHURST, P. ; KNIGHT, W.: *Design for Manufacture and Assembly*. New York : Marcel Dekker Inc., 2002
- [BDV<sup>+</sup>03] BURR, H. ; DEUBEL, T. ; VIELHABER, M. ; HAASIS, S. ; WEBER, C.: Challenges for CAX and EDM in an International Automotive Company. In: *ICED 03, 14th International Conference on Engineering Design*, 2003
- [BDVW04] BURR, H. ; DEUBEL, T. ; VIELHABER, M. ; WEBER, C.: Integriertes Produkt- und Prozessdatenmanagement als Basis moderner Engineeringmethoden. In: *VDI-Bericht 1819, Konferenz-Einzelbericht Integrierte Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung*, 2004, S. 245–256
- [Ber10] BERGSTRAESSER, S.: *Virtuell Kontextbasierte Dienste*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2010
- [Bet91] BETRIEBSORGANISATION, REFA V.: *REFA - Aufbauorganisation*. Fachbuchverlag Leipzig, 1991
- [BLT01] BARTON, J. A. ; LOVE, D. M. ; TAYLOR, G. D.: Design determines 70% of cost? A review of implications for design evaluation. In: *Journal of Engineering Design* Bd. 12, 2001, S. 47–58
- [Bos07] BOSSMANN, M.: *Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung*, Universität des Saarlandes, Diss., 2007

- [Bur08] BURR, H.: *Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung im Korrossierrohbau*, Universität des Saarlandes, Diss., 2008
- [BVD<sup>+</sup>04] BURR, H. ; VIELHABER, M. ; DEUBEL, T. ; WEBER, C. ; HAASIS, S.: CAx/EDM Integration - Enabler for Methodical Benefits in the Design Process. In: *Design 2004 : Proceedings of the 8th International Design Conference*, 2004, S. 833–840
- [BW96] BULLINGER, H.-J. ; WARSCHAT, J.: *Concurrent Simultaneous Engineering Systems*. Springer Verlag, 1996
- [Chu05] CHUNG, Qingjin Chulho; P. Chulho; Peng: A novel approach to the geometric feasibility analysis for fast assembly tool reasoning. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, S. 125–134
- [Cra05] CRAMER, H.: Schweißtechnische Besonderheiten am Audi A3 Sportsback. In: *GSI News - Informationsblatt zu aktuellen Fragen der Füge-, Trenn- und Prüftechnik*, 2005, S. 2
- [DIN87] *DIN EN ISO 9000 - Grundlagen und Begriffe zu Qualitätsmanagementsystemen*. Berlin : Beuth Verlag, 1987
- [DIN03a] *DIN 8580 - Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung*. Berlin : Beuth Verlag, 2003
- [DIN03b] *DIN 8593-0 Fertigungsverfahren Fügen, Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin : Beuth Verlag, 2003

- [DIN10] *DIN EN 13306 - Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung.* Berlin : Beuth Verlag, 2010
- [DIN12] *DIN 31051 - Grundlagen der Instandhaltung.* Berlin : Beuth Verlag, 2012
- [DK11] DECKER, K. H. ; KABUS, K.: *Decker Maschinenelemente - Funktion, Gestaltung und Berechnung.* 18. Carl Hanser Verlag, 2011
- [Döb08] DÖBLER, T.: *Simulation und Visualisierung in der Produktentwicklung / FAZIT Forschung.* 2008. – Forschungsbericht
- [DS06] DIETRICH, L. ; SCHIRRA, W.: *Innovationen durch IT, Erfolgsbeispiele aus der Praxis, Produkte, Prozesse, Geschäftsmodelle.* Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2006
- [Ehr07] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit.* 3. Wien München : Carl Hanser Verlag, 2007
- [EKL07] EHRENSPIEL, K. ; KIEWERT, A. ; LINDEMANN, U.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren.* Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2007
- [Erh08] ERHARD, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen.* 4. Carl Hanser Verlag, 2008

- [ES05] EVERSHEIM, W. ; SCHUH, G.: *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2005
- [ES09] EIGNER, M. ; STELZER, R.: *Product Lifecycle Management*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2009
- [FG08] FELDHUSEN, J. ; GEBHARDT, B.: *Product Lifecycle Management für die Praxis - Ein Leitfaden zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung*. Heidelberg : Springer Verlag, 2008
- [Fis08] FISCHER, J.: *Kostenbewusstes Konstruieren, Praxisbewährte Methoden und Informationssysteme für den Konstruktionsprozess*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2008
- [Fra03] FRANKE, C.: *Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik*, Universität des Saarlandes, Diss., 2003
- [FS00] FENG, S. C. ; SONG, E. Y.: Information Modeling of Conceptual Design Integrated With Process Planning. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* Bd. 109, 2000
- [Gai81] GAIROLA, A.: *Montagegerechtes Konstruieren - Ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik*, TH Darmstadt, Diss., 1981

- [GLK08] GEISSEL, O. ; LONGITHANO, L. ; KATZENBACH, A.: Operativer Einsatz von Mixed Reality Technologien im Baubarkeitsprozess der Fahrzeugentwicklung. In: *7. Paderborner Workshop für Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung*, 2008
- [Göh02] GÖHLICH, D.: *Produkt-Datenmanagement in der Mercedes-Benz PKW-Entwicklung*. Vorlesung ETH Zürich, 31.10.2002, 2002
- [Gör05] GÖRZ, M.: *Effiziente Echtzeit-Kommunikationsdienste durch Einbeziehung von Kontexten*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2005
- [GSAM97] GRABOWSKI, H. ; SPATH, D. ; AGOSTINI, A. ; MICHELIS, A.: Integrierte Produktentwicklung auf Basis von Konstruktions- und Planungsräumen. In: *Neue Generation von CAD/CAM-systemen: erfüllte und enttäuschte Erwartungen VDI BERICHTE* Bd. 1357, VDI Verlag GmbH, 1997, S. 549–559
- [Han55] HANSEN, Friedrich ; ONLINE: WWW.TU-ILMENAU.DE/KONSTRUKTIONSTECHNIK (Hrsg.): *Konstruktionssystematik; eine Arbeitsweise für fortschrittliche Konstrukteure*. 2. VEB Verlag Technik, 1955
- [HB00] HOLLAND, W. ; BRONSVOORT, W. F.: Assembly feature in modelling and planning. In: *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* (2000), Nr. 16, S. 277–294

- [HB08] HÜTTENRAUCH, M. ; BAUM, M.: *Effiziente Vielfalt - Die dritte Revolution in der Automobilindustrie*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2008
- [ISO05] *ISO 1703 - Assembly tools for screws and nuts - Designation and nomenclatur*. 2005
- [Jan04] JANIA, T.: *Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung*, Universität Paderborn, Diss., 2004
- [Kie07] KIEFER, J.: *Mechatronkorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau*, Universität des Saarlandes, Diss., 2007
- [LBM07] LUCKO, A. ; BROCKMEYER, H. ; MANTWILL, F.: Entwicklung eines KBE-Ansatzes zur Absicherung von Schweißpunkten in CATIA V5. In: *Uniforschung – Forschungsmagazin der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg*, 2007, S. 26–31
- [Lin07] LINDEMANN, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2007
- [Lis07] LIST, Ronald: *CATIA V5 - Grundkurs für Maschinenbauer*. 3. Vieweg und Sohn Verlag, 2007
- [LRIL97] LINDEMANN, U. ; REINHART, G. ; IRLINGER, R. ; LOFFERER, M.: Integrierte Gestaltung von Produkt und Produktionsmittel. In: *Neue Generation von CAD/CAM-Systemen*, 1997, S. 161–182

- [LW06] LOTTER, B. ; WIENDAHL, H.-P.: *Montage in der industriellen Produktion, Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2006
- [Mei10] MEISSNER, R.: *Digitale Absicherung der Montagetauglichkeit - ein Beitrag zur Integration von Produktentwicklung und Montageplanung*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss., 2010
- [Mey07] MEYWERK, M.: *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2007
- [MG11] MENNENGA, R. ; GROOTHUIS, H.: Entwicklung und Betrieb positionsgesteuerter Schraubwerkzeuge. In: *Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme*, 2011, S. 111–120
- [MMW<sup>+</sup>01] MATEK, W. ; MUHS, D. ; WITTEL, H. ; BECKER, M. ; JANNASCH, D.: *Roloff/Matek Maschinenelemente - Normung, Berechnung, Gestaltung*. 15. Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2001
- [Mül07] MÜLLER, M.: *Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen am Beispiel der produktionsbezogenen Produktabsicherung in der Automobilindustrie*, Universität des Saarlandes, Diss., 2007
- [NN09] NN: Ergebnisse der deutschen Innovationserhebung 2008 / Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH. 2009. – Forschungsbericht

- [Paa98] PAASHUIS, V.: *The Organisation of Integrated Product Development*. London : Springer Verlag, 1998
- [PBF07] PAHL, G. ; BEITZ, W. ; FELDHUSEN, J. ; GROTHE, K.-H.: *Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2007
- [Pul04] PULM, U.: *Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung*, Technische Universität München, Diss., 2004
- [Rau11] RAUBOLD, U.: *Lebenszyklusmanagement in der Automobilindustrie - Ein Optimierungsansatz auf Basis der auf den Lebenszyklus wirkenden Einflussfaktoren*, Technische Universität Cottbus, Diss., 2011
- [RB08] RESCH, J. ; BÄR, T.: Dokumentation und geometrische Absicherung von Verbindungen. In: *19. Symposium „Design for X“*, 2008
- [Res06] RESCH, J.: *Entwurf und Umsetzug einer Methode zur produktionsorientierten Produktenwicklung und -absicherung*. 2006
- [Rot96] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Band 3, Verbindungen und Verschlüsse Lösungsfindung*. Springer Verlag, 1996

- [RWPM09] RESCH, J. ; WALLA, W. ; PRIEUR, M. ; MEISSNER, R.: Production-oriented product validation applied to the example of automated tool accessibility. In: *3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009)*, 2009, S. 472–481
- [SAKR05a] SCHÄPPI, B. ; ANDREASEN, M. M. ; KIRCHGEORG, M. ; RADERMACHER, F.-J.: *Handbuch Produktentwicklung*. Hanser Verlag, 2005
- [SAKR05b] *Kapitel Informationsmanagement - Management der produkt- und prozessbezogenen Information in der integrierten Produktentwicklung*. In: SCHÄPPI, B. ; ANDREASEN, M. M. ; KIRCHGEORG, M. ; RADERMACHER, F.-J.: *Handbuch Produktentwicklung*. Springer Verlag, 2005
- [SAKR05c] *Kapitel Concurrent Engineering - Effiziente Integration der Aufgaben im Entwicklungsprozess*. In: SCHÄPPI, B. ; ANDREASEN, M. M. ; KIRCHGEORG, M. ; RADERMACHER, F.-J.: *Handbuch Produktentwicklung*. Springer Verlag, 2005
- [SBL10] SCHLICK, C. ; BRUDER, R. ; LUCZAK, H.: *Arbeitswissenschaft*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2010
- [SBM<sup>+</sup>05] SCHEER, A.-W. ; BOCZANSKI, M. ; MUTH, M. ; SCHMITZ, W.-G. ; SEGELBACHER, U.: *Prozessorientiertes Product Lifecycle Management*. Springer Verlag, 2005
- [Sch97] SCHEER, A.-W.: *Wirtschaftsinformatik, Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse*. 7. Springer Verlag, 1997

- [Sch98] SCHERTLER, W.: *Unternehmensorganisation: Lehrbuch der Organisation und strategischen Unternehmensführung*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 1998
- [SI08] SCHINDLER, V. ; I., Sievers: *Forschung für das Auto von Morgen*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2008
- [SKR10] STARK, R. ; KIM, M. ; ROTHENBURG, U.: Vom virtuellen Produkt zur digitalen Fabrik: Potentiale und Herausforderungen. In: *8. Internationales Produktionstechnisches Kolloquium*, 2010, S. 87–97
- [SM02] SVENSSON, D. ; MALMQVIST, J.: Strategies for Product Structure Management at Manufacturing Firms. In: *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* (2002), S. 50–58
- [Sve03] SVENSSON, D.: *Towards Product Structure Management in Heterogeneous Environments*, Chalmers University of Technology, Diss., 2003
- [UDGG01] UNGER, B. ; DANNBAUER, H. ; GAIER, C. ; GUMPINGER, J.: Rechnerische Simulation von Schweißnähten und punktförmigen Fügungen im Fahrzeugbau. In: *Konstruktion* (2001), Nr. 9-2001
- [VDI93] *VDI 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme*. Berlin : Beuth Verlag, 1993
- [VDI94] *VDI 2216 - Datenverarbeitung in der Konstruktion*. Berlin : Beuth Verlag, 1994

- [VDI96] *VDI 3633 - Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Begriffsdefinitionen.* Berlin : Beuth Verlag, 1996
- [VDI97] *VDI 3633 Blatt 3 - Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Experimentplanung und -auswertung.* Berlin : Beuth Verlag, 1997
- [VDI99a] *VDI 2218 - Feature-Technologie.* Berlin : Beuth Verlag, 1999
- [VDI99b] *VDI 2862 - Einsatz von Schraubsystemen in der Automobilindustrie.* Berlin : Beuth Verlag, 1999
- [VDI00] *VDI 3633 Blatt 1 - Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Grundlagen.* Berlin : Beuth Verlag, 2000
- [VDI02] *VDI 2219 - Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - Einführung und Wirtschaftlichkeit von EDM/PDM Systemen.* Berlin : Beuth Verlag, 2002
- [VDI04a] *VDI 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.* Berlin : Beuth Verlag, 2004
- [VDI04b] *VDI 2223 - Methodisches Entwerfen technischer Produkte.* Berlin : Beuth Verlag, 2004
- [VDI04c] *VDI 2232 - Methodische Auswahl fester Verbindungen - Systematik, Konstruktionskataloge, Arbeitshilfen.* Berlin : Beuth Verlag, 2004

- [VDI06] VDI 2209 - 3-D-Produktmodellierung. Berlin : Beuth Verlag, 2006
- [VDI09] VDI 3633 Blatt 11 - Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Simulation und Visualisierung. Berlin : Beuth Verlag, 2009
- [Vie05] VIELHABER, M.: *Assembly Oriented Design: Zusammenbauorientiertes Konstruieren im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie am besonderen Beispiel des Karosserierohbaus*, Universität des Saarlandes, Diss., 2005
- [VKH06] VOLLSTEDT, T. ; KÖRNER, S. ; HAASE, L.: Integrierte Montage- und Logistikplanung. In: *VDI-Z* (2006), S. 58–60
- [VWBZ09] VAJNA, S. ; WEBER, C. ; BLEY, H. ; ZEMAN, K.: *CAX für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2009
- [Wac11] WACK, K.-J.: Virtuelle Produktionsabsicherung am Beispiel Montage Powertrain. In: *Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme*, 2011, S. 111–120
- [WBK<sup>+</sup>08] WEYAND, L. ; BLEY, H. ; KAISER, J.-M. ; MEISSNER, R. ; BÄR, T.: Production Oriented Design-Checks in Car Manufacturing - Not Only a Question of Powerful Digital Validation Tools. In: *6th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, 2008, S. 175–178

- [Web07] WEBER, C.: Looking at „DFX“ and „Product Maturity“ from the Perspective of a New Approach to Modelling Product and Product Development Processes. In: *Proceedings of the 17th CIRP Design Conference. The Future of Product Development*, Springer Verlag, 2007, S. 85–104
- [Web09] WEBER, J.: *Automotive Development Processes*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2009
- [Wes06] WESTKÄMPER, E.: *Einführung in die Organisation der Produktion*. Springer Verlag, 2006
- [Wil10] WILLE, H.: Innovationsmanagement in der Produktion - ein wesentlicher zur Generierung von Wettbewerbsvorteilen. In: *8. Internationales Produktionstechnisches Kolloquium*, 2010, S. 33–52
- [WS05] WÖHLKE, G. ; SCHILLER, E.: *Digital Planning Validation in Automotive Industry*. 2005
- [WW00] WEBER, C. ; WERNER, H.: Klassifizierung von CAx-Werkzeugen für die Produktentwicklung auf der Basis eines neuartigen Produkt- und Prozessmodells. In: *11. Symposium „Design for X“*, 2000, S. 126–143
- [WW01] WEBER, C. ; WERNER, H.: Schlussfolgerungen für „Design for X“ (DfX) aus der Perspektive eines neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen. In: *12. Symposium „Design for X“*, 2001, S. 37–48

- [ZLF98] ZAH, X. F. ; LIM, S. Y. E. ; FOK, S. C.: Integrated intelligent Design and Assembly Planning: A Survey. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Bd. 14, 1998, S. 664–685



## Abbildungsverzeichnis

1.1. Vorgehensmodell zur Beschreibung eines Problems . . . .	6
1.2. Aufbau der Arbeit . . . . .	12
2.1. Produktlebensphasen . . . . .	16
2.2. Einordnung des Produktentstehungsprozesses in den Produktlebenslauf [ES09] . . . . .	18
2.3. Systemtechnischer Problemlösungszyklus, nach VDI 2221 [VDI93] . . . . .	20
2.4. Modell der Integrierten Produktentwicklung [And87] . .	23
2.5. CPM-Basismodell zur Beschreibung der Analyse und Synthese während der Produktentwicklung [WW00] . . . . .	25
2.6. Kontinuierliche Reifegradsteigerung durch iterative Analyse- und Syntheseschritten [WW00] . . . . .	27
2.7. Ausprägungen des „Design <b>for</b> X“ und des „Design <b>of</b> X“ [Web07] . . . . .	28
2.8. Aufbau einer Produktstruktur mit Varianten- und Versionsinformationen . . . . .	33
2.9. Geometrievarianz (Bauteil Rahmen 1 und Rahmen 2) und Lagevarianz (Bauteil Rad.2) in einer Produktstruktur [Vie05] . . . . .	34
2.10. Modulare Gliederung einer Baureihe, nach [Göh02] . . .	35
2.11. Beispiel unterschiedlichen Sichten auf eine Produktstruktur . . . . .	37

2.12. Informationsflüsse in der Integrierten Produktentwicklung, nach [SAKR05b] . . . . .	39
2.13. Zusammenspiel von Verwaltungs- und Autorensystemen	44
2.14. Heterogenität der IT-Systeme entlang des Produktentstehungsprozesses, nach [SAKR05b] . . . . .	45
2.15. Kontextorientierte Absicherung des Produktes auf Basis von Anforderungen aus unterschiedlichen Lebensphasen während der Produktentstehung . . . . .	48
3.1. Einteilung fester Verbindungen, nach [Rot96, AOK80, DK11] . . . . .	54
3.2. Elemente einer festen Verbindung: a, b - Verbindungspartner; c, d - Verbindungshilfsmittel . . . . .	55
3.3. Einteilung der Fertigungsverfahren „Fügen“ [DIN03b] . .	55
3.4. Beispiel einer Schnappverbindung: a) als differenzierte Lösung, b) als integrierte Lösung . . . . .	58
3.5. Produktstruktur und 3D-Modell einer Schraubverbindung	62
3.6. Dokumentation von Verbindungsinformationen in einer Zusammenbauzeichnung [Vie05] . . . . .	64
3.7. Dokumentation von Verbindungen am Zusammenbauobjekt [Vie05] . . . . .	65
3.8. Exemplarische Darstellung eines kaskadierenden Zusammenbaus . . . . .	66
3.9. Dokumentation von Verbindungsinformationen an einem der Bauteile einer Verbindung [Vie05] . . . . .	68
3.10. Dokumentation von Verbindungsinformationen in einem zusätzlichen Einzelteil [Vie05] . . . . .	70
3.11. Abbildung unterschiedlicher Verbindungsgeometrien mit Hilfe von Referenzelementen . . . . .	73

---

3.12. Variantenmanagement bei der Dokumentation von Verbindungs- informationen auf der Ebene des Zusammen- baus [Vie05] . . . . .	77
3.13. Variantenmanagement bei der Dokumentation Verbindungs- informationen auf Ebene der Einzelteile [Vie05] . .	78
3.14. Einordnung von Modellerstellung, Experimentplanung und Auswertung in die allgemeine Vorgehensweise bei einer Simulation [VDI97] . . . . .	81
3.15. Beispiel einer Kollisionsanalyse im CAD-System CATIA V5 der Firma Dassault Systèmes . . . . .	83
3.16. Erforderliche Freiräume beim Fügen einer Schraube [LW06]	85
4.1. Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie .	88
4.2. Veränderung einer 3D-Szene durch Rotation um die Y- Achse, Bauteil b bewegt sich dabei aus dem sichtbaren Bereich heraus . . . . .	93
4.3. Konfiguration von Montagewerkzeugen . . . . .	98
4.4. Konfigurationskette, gebildet aus Schraube, Nuss, Ver- längerung und Antrieb . . . . .	99
4.5. Positionierung einer Nuss an einer Schraube mit Hilfe von Referenzelementen . . . . .	100
4.6. Visualisieren von Kollisionen durch Hervorhebung der betroffenen Bauteil- und Werkzeuggeometrie . . . . .	101
4.7. Beispiel einer Werkzeugabsicherung mit einem zusätzli- chem Handmodell . . . . .	102
4.8. Zusammenfassung von Simulationsläufen in einer Matrix	103
4.9. Betroffene Systeme bei der Dokumentation und Absiche- rung von Verbindungen . . . . .	104
4.10. Bereitstellung von Daten für die unterschiedlichen Dis- ziplinen . . . . .	107

6.1. Grobe Vorpositionierung von Bauteilen in einer 3D-Szene	128
6.2. Referenzelemente an einer Bohrung . . . . .	129
6.3. Rotation und Verschiebung, um eine Schraube an einer Bohrung zu positionieren . . . . .	129
6.4. Drehung der Schraube, falls der Richtungsvektor in die falsche Richtung zeigt . . . . .	131
6.5. Zusätzliche Möglichkeiten zur Bestimmung von Einfüge- punkt und Richtungsvektor . . . . .	131
6.6. Informationsbündelung in einem Verbindungsobjekt . .	134
6.7. Allgemeingültige und kontextabhängige Informationen einer Verbindung . . . . .	135
6.8. Bildung von Pfaden auf Basis des Relationszählers für gleiche Sachnummern unterhalb eines Strukturknotens .	139
6.9. Dokumentation von Referenzelementen in Verbindungs- objekten am Beispiel einer Schraubverbindung . . . . .	140
6.10. Verwaltung von Verbindungsobjekten in einer eigenen Struktur . . . . .	145
6.11. Abbildung von Verbindungen in variantenreichen Struk- turen . . . . .	146
6.12. Systemlandschaft zur Dokumentation und kontextorien- tierten Absicherung von Verbindungen . . . . .	147
6.13. Verknüpfung von Merkmalen des Produktes und Merk- male des x-Systems während der digitalen Absicherung .	149
6.14. Zusammenspiel der Anforderungen an das Produkt und den Anforderungen der unterschiedlichen Lebensphasen	151
6.15. Freiheitsgrade bei der Absicherung von Produkt und x- System . . . . .	153
6.16. Berücksichtigung des Kontextes bei der Planung, Durch- führung und Auswertung von digitalen Absicherungen, nach [VDI97] . . . . .	154

7.1. Arbeitsschritte bei der Erstellung von Verbindungen . .	160
7.2. Grobpositionierung einer Schraube in der Nähe eines Bauteils . . . . .	161
7.3. Selektion von Referenzelementen an einer Schraube für eine Feinpositionierung . . . . .	162
7.4. Mehrfache Positionierung gleichartiger Verbindungselemente . . . . .	164
7.5. Ablauf zur Erstellung von Verbindungsobjekten für eine Verbindung . . . . .	165
7.6. Verbindungsassistent zur Verwaltung von Verbindungsobjekten . . . . .	166
7.7. Einfache Schraubverbindung mit zwei Verbindungspartnern . . . . .	167
7.8. Bearbeitung der Verbindungsinformationen im Verbindungsobjekteditor . . . . .	168
7.9. Referenzelement an einer Schraubverbindung . . . . .	170
7.10. Referenzelemente zur Abbildung von Verbindungen	
a) an einem Verbindungshilfsmittel (Schraube)	
b) ohne festgelegtes Verbindungshilfsmittel	
c) als Schweißnaht . . . . .	171
7.11. Klärung der Aufgabenstellung . . . . .	174
7.12. Geometrien von automatisierten und manuellen Werkzeugen sowie Hilfsmittel zur Erstellung von Werkzeugkonfigurationen . . . . .	175
7.13. Verfügbare Werkzeuge und Aufgabenstellung zur Absicherung von zwei Kontexten . . . . .	176
7.14. Arbeitsschritte bei der Erstellung bzw. beim Variieren des Simulationsmodells . . . . .	177
7.15. Planung der Simulation als manuelle oder automatisierte Simulation . . . . .	179

7.16. Kombinationsvielfalt bei der Erstellung von Werkzeugkonfigurationen . . . . .	180
7.17. Durchführung der Simulation und Visualisierung der Ergebnisse . . . . .	181
7.18. Auswertung der Simulationsergebnisse und Festlegung der nächsten Schritte . . . . .	182
7.19. Reduzierung der möglichen Werkzeugkonfigurationen auf diejenigen, die eine kollisionsfreie Montage bzw. Demontage ermöglichen . . . . .	183

## Tabellenverzeichnis

3.1. Übersicht der häufigsten Verbindungsarten in einem A3 Sportback [Cra05] und einer C-Klasse Limousine (interne Analyse) . . . . .	56
---	----

## Liste der bisher erschienenen Bände, Stand 01.08.2016

### Bericht aus dem Institut für Maschinenelemente und Konstruktion (IMK), 1990 – 2010

- Band 1**    **Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau (Hrsg.):**  
Forschung und Lehre im Institut für Maschinenelemente und  
Konstruktion  
(Institutsbericht)  
Ilmenau : ISLE, 1999. - ISBN 3-932633-37-7
- Band 2**    **Spiller, Frank:**  
Möglichkeiten der rechentechnischen Umsetzung von Erkenntnissen aus  
der Konstruktions-systematik unter Nutzung der Featuretechnologie  
(Dissertation TU Ilmenau 1998)  
Ilmenau : ISLE, 1998. - ISBN 3-932633-20-2
- Band 3**    **Leibl, Peter:**  
Entwicklung eines featureorientierten Hilfsmittels für die Konstruktion  
kostengünstiger Produkte  
(Dissertation TU Ilmenau 1998)  
Ilmenau : ISLE, 1998. - ISBN 3-00-003695-4
- Band 4**    **Lutz, Steffen:**  
Kennlinie und Eigenfrequenzen von Schraubenfedern  
(Dissertation TU Ilmenau 2000)  
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-47-4
- Band 5**    **Kletzin, Ulf:**  
Finite-Elemente-basiertes Entwurfssystem für Federn und  
Federanforderungen  
(Dissertation TU Ilmenau 2000)  
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-48-2
- Band 6**    **Volz, Andreas K.:**  
Systemorientierter Karosserie-Konzeptentwurf am Beispiel der  
Crashsimulation  
(Dissertation TU Ilmenau 1998)  
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-52-0

- Band 7 Brix, Torsten:**  
Feature- und constraint-basierter Entwurf technischer Prinzipie  
(Dissertation TU Ilmenau 2001)  
Ilmenau : ISLE, 2001. - ISBN 3-932633-67-9
- Band 8 Rektor der TU Ilmenau und Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau (Hrsg.) in Zusammenarbeit mit Carl Zeiss Jena GmbH**  
Vom Arbeitsblatt zum virtuellen Prototyp – 50 Jahre  
Konstruktionssystematik  
(Institutsbericht)  
Ilmenau : ISLE, 2002. - ISBN 3-932633-68-7
- Band 9 Liebermann, Kersten:**  
Rechnergestütztes Entwurfs- und Optimierungssystem für  
Schraubendruckfedern  
(Dissertation TU Ilmenau 2003)  
Ilmenau : ISLE, 2003. - ISBN 3-932633-74-1
- Band 10 Meissner, Manfred; Denecke, Klaus:**  
Die Geschichte der Maschinenelemente als Fachgebiet und Institut an  
der Technischen Universität Ilmenau von 1953 bis 2003  
(Institutsbericht)  
Ilmenau : ISLE, 2003. - ISBN 3-932633-82-2
- Band 11 Geinitz, Veronika:**  
Genauigkeits- und auslastungsoptimierte Schraubendruckfedern  
(Dissertation TU Ilmenau 2006)  
Ilmenau : ISLE, 2006. - ISBN 3-938843-11-X
- Band 12 Institut für Maschinenelemente und Konstruktion (Hrsg.):**  
Festschrift zum Ehrenkolloquium anlässlich der Emeritierungen von  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Günter Höhne und Univ.-Prof. Dr.-  
Ing. habil. Hans-Jürgen Schorcht  
(Institutsbericht)  
Ilmenau : ISLE, 2005. - ISBN 3-932633-97-0
- Band 13 Wittkopp, Tobias:**  
Mehrkörpersimulation von Schraubendruckfedern  
(Dissertation TU Ilmenau 2005)  
Ilmenau : ISLE, 2005. - ISBN 3-938843-07-1
- Band 14 Frank, Stefan:**  
Justierdrehen – eine Technologie für Hochleistungsoptik  
(Dissertation TU Ilmenau 2007)  
Ilmenau : ISLE, 2008. - ISBN 978-3-938843-35-4

**Band 15 Schilling, Thomas:**

Augmented Reality in der Produktentstehung  
(Dissertation TU Ilmenau 2008)  
Ilmenau : ISLE, 2008. - ISBN 978-3-938843-42-0

**Band 16 Lotz, Markus:**

Konstruktion von Messspiegeln hochgenauer Mess- und  
Positioniermaschinen  
(Dissertation TU Ilmenau 2009)  
Ilmenau : ISLE, 2009. - ISBN 978-3-938843-46-8

**[Band 17] Hackel, Tobias:**

Grundlegende Untersuchungen zu vertikalen Positioniersystemen für  
Nanopräzisionsmaschinen  
(Dissertation TU Ilmenau 2010)  
Münster, Westf : Monsenstein und Vannerdat, 2010. - ISBN 978-3-  
86991-111-3

**[Band 18] Frank, Thomas:**

Konzeption und konstruktive Gestaltung der Messkreise von  
Nanomessmaschinen  
(Dissertation TU Ilmenau 2010)  
Münster, Westf : Monsenstein und Vannerdat, 2010. - ISBN 978-3-  
86991-194-6

**Berichte aus dem Institut für Maschinen- und  
Gerätekonstruktion (IMGK), 2010 - ...**

**Band 19 Sondermann, Mario:**

Mechanische Verbindungen zum Aufbau optischer  
Hochleistungssysteme  
(Dissertation TU Ilmenau 2010)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2011. - ISBN 978-3-939473-94-7

**Band 20 Stephan Husung:**

Simulation akustischer Produkteigenschaften unter Nutzung von Virtual  
Reality während der Produktentwicklung  
(Dissertation TU Ilmenau 2011)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2012. - ISBN 978-3-86360-026-6

- Band 21 Dobermann, Dirk:**  
Stabilisierung der Bildlage abbildender optischer Systeme  
(Dissertation TU Ilmenau 2012)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - ISBN 978-3-86360-056-3
- Band 22 Taubmann, Peter:**  
Analyse der Ventildfederbewegung als Beitrag zur Beeinflussung der  
Verschleißursachen an den Auflageflächen  
(Dissertation TU Ilmenau 2013)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - ISBN 978-3-86360-059-4
- Band 23 Erbe, Torsten:**  
Beitrag zur systematischen Actor- und Actorprinzipauswahl im  
Entwicklungsprozess  
(Dissertation TU Ilmenau 2013)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - ISBN 978-3-86360-060-0
- Band 24: Ginani, Luciano Selva**  
Optical Scanning Sensor System with Submicron Resolution  
(Dissertation TU Ilmenau 2013)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - ISBN 978-3-86360-068-6
- Band 25: Heidler, Nils**  
Untersuchungen zylindrischer Gasführungselemente für  
Hochvakuumanwendungen  
(Dissertation TU Ilmenau 2015)  
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2016. - ISBN 978-3-86360-130-0
- Band 26: Reich, René**  
Möglichkeiten und Grenzen bei der Auslegung von  
Schraubendruckfedern auf Basis von Umlaufbiegeprüfungen  
(Dissertation TU Ilmenau 2016)  
Ilmenau : Universitätsverlag Ilmenau, 2016. - ISBN 978-3-86360-139-3
- Band 27: Resch, Jens**  
Kontextorientierte Entwicklung und Absicherung von festen  
Verbindungen im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie  
(Dissertation TU Ilmenau 2016)  
Ilmenau : Universitätsverlag Ilmenau, 2016. - ISBN 978-3-86360-143-0