

**Entwicklung eines integrierten Ansatzes  
zur Optimierung von dünnwandigen Blechbauteilen  
im Karosserierohbau mithilfe von Toleranzsimulationen**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
des Doktors der Ingenieurwissenschaften  
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität des Saarlandes

von

Frank Litwa

Saarbrücken

2018

Tag des Kolloquiums: 18.12.2018

Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. G. Kickelbick

Berichtersteller/innen: Prof. Dr.-Ing. M. Vielhaber

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. H.-G. Herrmann

Akad. Mitarbeiter/in: Dr.-Ing. Dr. A. Jung

## Kurzfassung

Die Elektromobilität ist die wohl größte Herausforderung für die sich ständig weiterentwickelnde Automobilindustrie. Zur Bewältigung dieses Wandels ist es zwingend notwendig, neben dem bestehenden Verbrenner-Produktportfolio ein zusätzliches Elektro-Produktportfolio zu installieren, um so den Anforderungen der Kunden gerecht zu werden. Dies führt allerdings zu einer Erhöhung der Derivatanzahlen im jeweiligen Unternehmen. Damit einher geht ein zusätzlicher Entwicklungsaufwand. Im Kontext des Karosserierohbaus bedeutet das, dass neben zusätzlichen neuen Anforderungen an den Rohbau (E-Drive, Batterieanbindung etc.), in gleichbleibender Entwicklungszeit mehr Fahrzeuge in die Serienreife überführt werden müssen. Vor dem Hintergrund einer drastischeren Verkürzung der Entwicklungszeit müssen die bestehenden Produktentwicklungsmethoden kritisch hinterfragt und optimiert werden. Eine Vernetzung der einzelnen Produktentwicklungsdisziplinen kann hier helfen. Dem Toleranzmanagement als bereichsübergreifende Disziplin kommt hier eine Schlüsselrolle zu.

Diese Arbeit beschreibt die Methodik eines integrierten Ansatzes zur Optimierung von dünnwandigen Blechbauteilen im Karosserierohbau mithilfe von Toleranzsimulationen. Basierend auf der Analyse der Produkt- und Produktionsentwicklung im Kontext des Toleranzmanagements und der Optimierung wird Handlungsbedarf abgeleitet. Es werden informationstechnische, methodische, prozessuale und systemtechnische Defizite im heutigen Produktentstehungsprozess in Bezug auf das Toleranzmanagement ausgewiesen.

Das im Syntheseteil der Arbeit vorgestellte Konzept, behebt schrittweise die ausgewiesenen Defizite. Im Vordergrund der Betrachtungen steht dabei vor allem die Beschreibung der informationstechnischen und methodischen Optimierungsmöglichkeiten. Abschließend wird das vorgestellte Konzept im Rahmen einer Software umgesetzt und basierend auf Produktentwicklungsdaten aus dem Karosserierohbau validiert.





## **Abstract**

From the very beginning the automotive industry has been in a constant state of flux. Nowadays one of the mega trends is pointing towards electro mobility. To tackle this issue and to be more competitive, the automotive industry is forced to install a portfolio of electric vehicles beside the existing combustion engine vehicles. In industrial perspective, this leads to an increasing number of derivatives. The complexity hiked in development, boundary conditions and requirements (e.g. E-Drive, battery alignment etc.). The number of vehicles get into the series production at the same time increased. If consideration is taken for shortening the development time, current methods of product development has to be re-examined. One possible solution is a deeper interlinkage of the product development disciplines. Disciplines like dimensional management have a key role in that.

By means of this research, a concept developed for the optimization of vehicle structure using tolerance analysis. Deficits are derived based on an analysis of product- and process development as well as optimization in context of dimensional management. In today's context, identified deficits in data, methods, process as well as software. This causes problems in the dimensional management discipline.

The synthesis part in this research is to solve stepwise the above mentioned deficits. Special attention made on deficits in the area of information provision and development methods. The research completed with concept implementation in software phase, as well as method validation using realistic (body-in-white) development data.



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Industriepromotion am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (LKT) der *Universität des Saarlandes* in Zusammenarbeit mit der *Entwicklungsabteilung Karosserierohbau, Rohbaukonzepte & Toleranzmanagement (RD/KRR)* der *Daimler AG* in Sindelfingen. Das Gelingen dieser Arbeit wurde erst durch die Unterstützung zahlreicher Personen ermöglicht, denen ich auf diesem Wege besonders danken möchte.

An erster Stelle gilt ein besonderer Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing M. Vielhaber, der durch seine wohlwollende Begleitung und Förderung zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die stets offene, kooperative und damit zielführende Zusammenarbeit bin ich ihm sehr dankbar.

Frau Prof. Dr.-Ing Kristin Paetzold, der Leiterin des *Instituts für technische Produktentwicklung der Universität der Bundeswehr* in München möchte ich für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Besonderer Dank gilt meinem fachlichen Betreuer seitens der *Daimler AG*, Dr.-Ing Martin Bohn. Die intensiven fachlichen Diskussionen sowie das hervorragende Betriebsklima haben geholfen, die Arbeit zu einem erfolgreichen Abschluss zu führen. Besonders seien an dieser Stelle meine Kollegen Martin Gottwald, Stephan Watrin, Dr.-Ing Robin Kaiser, Dr.-Ing Jonas Neckenich, Dr.-Ing Pascal Stoffels, Dr.-Ing Oliver Thome, Jörg Forstmeier und Peter Hanuska für die fachliche und persönliche Unterstützung erwähnt. Dank gebührt darüber hinaus auch meinem Vater Harald für das ausführliche Lektorat des Manuskriptes.

Danken möchte ich an dieser Stelle auch den Studenten, die mich bei der Forschung unterstützt haben: Aleks Smirnoff, Dimitri Danniker, Vicent Gasco, Moritz Kilgus, Marcel Lutz, Max Riekert und Sergej Spudeiko.

Nicht zuletzt möchte ich mich an dieser Stelle auch bei meiner Familie sowie bei meinen Freunden für ihre Unterstützung und das aufgebrachte Verständnis, Vertrauen und den Rückhalt während dieser nicht immer einfachen Zeit bedanken. Ganz besonderer Dank gebührt meinen Eltern. Mit all dem, was sie mir durch ihre liebevolle Erziehung mitgegeben haben, haben sie mir diesen Weg erst ermöglicht. Besonders danken möchte ich auch meiner Frau Mariana für Ihre stets verständnis- und liebevolle Unterstützung.



## I. Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	1
Abstract .....	1
Vorwort .....	3
I. Inhaltsverzeichnis.....	1
II. Abbildungsverzeichnis .....	7
III. Tabellenverzeichnis.....	15
IV. Glossar.....	16
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung und Hintergrund .....	1
1.2 Abgrenzung der Arbeit.....	2
1.3 Forschungsrelevante Fragestellungen .....	3
1.4 Angewandte Forschungsmethodik und methodisches Vorgehen.....	3
1.5 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Stand der Technik und industriellen Praxis.....	7
2.1 Produktentwicklungsprozess im Automobilbau .....	7
2.1.1 Begriffsverständnis Produkt und Produktentwicklung .....	7
2.1.2 Methoden und Vorgehensmodelle .....	10
2.1.3 Organisation des Produktentwicklungsprozesses.....	18
2.1.4 Beispiel eines Produktentwicklungsmodells im Automobilbau .....	20
2.1.5 Systeme (IT-Tools) im Produktentwicklungsprozess.....	24
2.1.6 Prozessmodellierung für effiziente Produktentwicklung.....	26
2.1.7 Informationen und Daten im Produktentwicklungsprozess .....	29
2.2 Produktionsentwicklung im Automobilbau .....	36

---

2.2.1	Begriffsverständnis Produktion, Produktionsentwicklung und Produktherstellung.....	36
2.2.2	Methoden der Produktionsentwicklung .....	37
2.2.3	Organisation des Produktionsentwicklungsprozesses.....	41
2.2.4	Systeme (IT-Tools) innerhalb des Produktionsentwicklungsprozesses .....	43
2.2.5	Produktionsentwicklungsmodelle in der Praxis.....	45
2.2.6	Informationen und Daten des Produktionsentwicklungsprozesses .....	47
2.2.7	Das Spann- und Fixierkonzept im Produktionsentwicklungsprozess.....	48
2.2.8	Grundlagen der Messtechnik .....	53
2.3	Toleranzmanagement im Automobilbau .....	58
2.3.1	Normative Grundlagen.....	59
2.3.2	Grundlagen und Begrifflichkeiten des Toleranzmanagements.....	60
2.3.3	Methodik des Toleranzmanagements .....	64
2.3.4	Organisationsformen des Toleranzmanagements.....	74
2.3.5	Aufgaben und Ergebnisse des Toleranzmanagements .....	75
2.3.6	Grundlagen der Toleranzsimulation.....	79
2.4	Optimierung.....	84
2.4.1	Grundlagen und Begrifflichkeiten der Optimierung .....	85
2.4.2	Optimierung im Kontext des Toleranzmanagements .....	101
3	Defizite und Ableiten der forschungsrelevanten Fragestellungen .....	105
3.1	Informationsflussprobleme innerhalb des Produktentwicklungs-prozesses in der Automobilbranche mit dem Fokus Karosserierohbau.....	106
3.1.1	Inkonsistenz der Informationskette im Entwicklungsprozess mit Auswirkungen auf das Toleranzmanagement.....	106
3.1.2	Inkonsistenz der Informationskette im Entwicklungsprozess verursacht durch das Toleranzmanagement.....	107

---

3.2	Methodische Verbesserungspotenziale im Entwicklungsprozess mit Fokus auf das Toleranzmanagement.....	107
3.2.1	Analyse der Verbesserungspotenziale im Bereich Toleranzsimulation .....	108
3.2.2	Analyse der Verbesserungspotenziale im Bereich Optimierung und Toleranzsimulation .....	108
3.3	Prozessuale und organisatorische Verbesserungspotenziale im Entwicklungsprozess mit Fokus auf dem Toleranzmanagement.....	110
3.3.1	Kritische Pfade des Entwicklungsprozesses mit Auswirkungen auf das Toleranzmanagement .....	110
3.3.2	Prozessuale Verbesserungspotenziale hinsichtlich der Informationsfluss-defizite .....	111
3.4	Systemtechnische Verbesserungspotenziale im Entwicklungsprozess mit Fokus auf dem Toleranzmanagement.....	112
4	Informationsbereitstellung, Methoden und Prozessentwicklung .....	115
4.1	Informationsbereitstellung für effizientes Toleranzmanagement .....	116
4.1.1	Methode zur Archivierung der Fügefolge im PDM-System .....	116
4.1.2	Methode zur Bereitstellung von Metadaten im Spann- und Fixierkonzept [Litw3].....	127
4.1.3	Methode zur Bereitstellung von Qualitätsmerkmalen im PDM System.....	129
4.2	Methodischer Ansatz zur Umsetzung der Verbesserungspotenziale für effizientes Toleranzmanagement .....	140
4.2.1	Methode zur Kopplung von PDM- / CAD-System an ein Toleranzanalysetool nach [Litw4].....	141
4.2.2	Methode zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen....	147
4.2.3	Methode zur Kopplung von PDM- / CAD-System sowie CAT-Toleranzanalysetool an einen Optimierer nach [Litw5, Litw6, Litw7].....	151
4.3	Veränderte Organisationsform sowie Prozessentwicklung als Grundlage eines effizienten Toleranzmanagements .....	158

---

4.3.1	Organisationsform für effizientes Toleranzmanagement.....	158
4.3.2	Prozessentwicklung zur Reduzierung kritischer Pfade im Bereich Toleranzmanagement .....	160
4.3.3	Prozess zur Sicherung der Konsistenz der Informationskette im Entwicklungsprozess außerhalb des Gewerk Toleranzmanagements.....	162
4.3.4	Prozess zur Sicherung der Informationskette im Entwicklungsprozess innerhalb des Gewerk Toleranzmanagements.....	164
4.4	Systemtechnische Umsetzung des Konzepts.....	165
5	Herausforderung bei der Umsetzung in bestehenden Systemlandschaften.....	168
6	Konzeptvalidierung des Ansatzes zur automatisierten Toleranzsimulationsmodellerstellung.....	170
6.1	Konzept zur Umsetzung im produzierenden Unternehmen am Beispiel der Daimler AG .....	170
6.2	Digitale Fügefolge .....	171
6.2.1	Grundgerüst der digitalen Fügefolge in der Daimler Systemlandschaft.....	171
6.2.2	Struktur des Fügegraphen in der Daimler Systemlandschaft .....	173
6.3	Digitale Qualitätsmerkmale .....	175
6.3.1	Namenskonvention der Qualitätsmerkmale.....	175
6.3.2	Einbindung in die Daimler Systemlandschaft.....	176
6.3.3	NX AddOn zur Erstellung der digitalen Qualitätsmerkmale.....	181
6.4	CAD-Datengrundlage zur automatisierten Erstellung von Toleranzsimulationsmodellen.....	183
6.4.1	Startmodell / Strukturierungsvorgaben der Daimler AG in Siemens NX .....	183
6.4.2	Fügetechnik in Siemens NX .....	186
6.4.3	Bezüge und Toleranzen in Siemens NX .....	188
6.4.4	Spann- und Fixierkonzept in Siemens NX.....	190
6.4.5	Messplanung in Siemens NX .....	190



---

6.5	Datenbank und Schnittstellenformat zur automatisierten Erstellung von Toleranzsimulationsmodellen.....	191
6.6	Software zur automatisierten Erstellung von Toleranzsimulationsmodellen .....	196
6.6.1	Datengrundlage.....	196
6.6.2	Einbindung der digitalen Fügefolge als AML.....	197
6.6.3	Einbindung des digitalen Fugenplans sowie des Funktionsmaßkatalogs zur Erstellung von Messungen an Qualitätsmerkmalen .....	198
6.6.4	Automatisierte Berechnung der Verbauoperationen .....	199
6.6.5	Grundlegende Einstell- und Eingriffsmöglichkeiten der Software.....	206
6.7	Anwendungsbeispiel zum automatisierten Erstellen von Toleranzsimulationsmodellen.....	208
6.7.1	Vergleich der Zusammenbauoperationen am Beispiel „Zusammenbau Heckmittelstück unten“ .....	210
6.7.2	Messergebnisse des „Zusammenbau Heckmittelstück unten“ .....	214
7	Konzeptvalidierung des methodischen Ansatzes zur Kopplung eines Optimierers.....	216
7.1	Konzept zur Umsetzung im produzierenden Unternehmen .....	216
7.2	Software zur Optimierung von Toleranzsimulationsmodellen.....	217
7.2.1	Datengrundlage.....	217
7.2.2	Methode zur Durchführung von Variationsanalysen an Toleranzsimulationsmodellen sowie initiale Einstellungen .....	219
7.2.3	Methode zur Durchführung von Optimierungen an Toleranzsimulationsmodellen, initiale Einstellungen .....	222
7.3	Anwendungsbeispiel zur Optimierung von Toleranzsimulationsmodellen.....	224
7.3.1	Optimierungsparameter am Beispiel „Heckmittelstück unten“ .....	224
7.3.2	Optimierungsergebnisse am Beispiel „Zusammenbau Heckmittelstück unten“ .....	225
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	228

---

8.1	Zusammenfassung .....	228
8.2	Beantwortung der Forschungsfragen .....	229
8.3	Fazit und Ausblick.....	233
	Literaturverzeichnis.....	236
A.	Anhang .....	247

## II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Anforderungen an den heutigen Karosserierohbau nach [Wall, Frei, Olsc].....	2
Abbildung 1.2 Aufbau der Arbeit .....	5
Abbildung 2.1 Zusätzliche Eigenschaften des Kernproduktes nach [www14].....	8
Abbildung 2.2 Zehner Regel in der Produktentwicklung nach [Ehre] .....	9
Abbildung 2.3 neun Phasen des Produktlebenszyklus in Anlehnung an [Ehre].....	10
Abbildung 2.4 Entwicklungsprozess nach VDI 2221 [VDI2221] .....	12
Abbildung 2.5 Mikrozyklus zur Problemlösung nach [Daen] .....	13
Abbildung 2.6 V-Modell für makroskopische Systeme nach [VDI2206] .....	14
Abbildung 2.7 Systementwurf nach [Kall1], [Pahl, Beit], [VDI2206] .....	16
Abbildung 2.8 Systemintegration nach VDI 2206 [VDI2206] .....	17
Abbildung 2.9 Organisationsmatrix im Fahrzeugbau bei Simultaneous Engineering in Anlehnung [Ehre] .....	18
Abbildung 2.10 Organisation bei Cross Enterprise Engineering in Anlehnung an [Ehre] .....	19
Abbildung 2.11 Prozessmodell im Intranet Daimler AG [Litw1] .....	19
Abbildung 2.12 Lage der Quality Gates im <i>Lead</i> -Prozess in Anlehnung an [Räse] .....	23
Abbildung 2.13 Prozessmasterplan mit Schwerpunkt auf der Produktentwicklung (Auszug)	24
Abbildung 2.14 PDM-System als Integrationsplattform unterschiedlicher Anwendungen, Prozesse und Organisationen in Anlehnung an [Katz1] .....	26
Abbildung 2.15 MDA Prozessentwicklung [www04] .....	27
Abbildung 2.16 Service orientated architecture and application (SOA) nach [Arsa].....	27
Abbildung 2.17 Prozessmodellierung bei der Daimler AG in Anlehnung an [Schm] .....	29
Abbildung 2.18 Informationen der technischen Zeichnung / Stückliste nach DIN 6789-2 (eigene Darstellung) .....	31
Abbildung 2.19 Vergleich der 2D Dokumentation (links) und der 3D Dokumentation nach 3D Mastermethode (rechts) der Baugruppe Scharnier [Kits, Hasl] .....	32

---

Abbildung 2.20 Übersicht der Einsatzgebiete der 3D-Mastermethode in den Branchen Automobilindustrie sowie Luft- und Raumfahrttechnik [Litw2] .....	33
Abbildung 2.21 Templateinsatz im Produktentwicklungsprozess [Katz2] .....	34
Abbildung 2.22 Untergliederter Entwicklungsprozess Produkt/ Produktion [Eign, Stel] .....	36
Abbildung 2.23 Vernetzung von Produktentwicklung und Produktionsentwicklung nach [Eign, Stel] .....	39
Abbildung 2.24 Die digitale Fabrik als Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Produktherstellung [Vajn, Webe].....	39
Abbildung 2.25 Reduzierung der Entwicklungszeit durch digitale Prototypen [Ovtc] .....	40
Abbildung 2.26 Matrixorganisation als Mischform bei der Automobilentwicklung in Anlehnung an [Ehre, Meer] .....	42
Abbildung 2.27 Die digitale Fabrik in der Matrixorganisation in Anlehnung an [Ehre, Meer]	43
Abbildung 2.28 Komponenten eines PLM-Systems nach [Eign, Stel] .....	44
Abbildung 2.29 Einsatz von PLM-Lösungen im Produktlifecycle nach [Abra, Schu] .....	45
Abbildung 2.30 Die Digitale Fabrik als vollvernetztes System im Entwicklungsprozess in Anlehnung an [Reit] [Litw2] .....	47
Abbildung 2.31 Y- Modell nach [Hirz, Diet, Gfre, Lang] .....	48
Abbildung 2.32 Spanntyp Auflagen (ungespannt und gespannt) .....	50
Abbildung 2.33 Spanntyp Fixierstifte (starr, ziehbar) .....	51
Abbildung 2.34 Spann-/ und Fixierkonzept / 3-2-1-Aufnahme.....	53
Abbildung 2.35 Gliederung der Prüftechnik nach [Weck] .....	54
Abbildung 2.36 Spezifikationen für Bezüge und Bezugsstellen .....	56
Abbildung 2.37 Messstrategie beim Messen von Fugenspalten .....	57
Abbildung 2.38 Messstrategie zum Messen von Fugenversatz.....	58
Abbildung 2.39 Tolerierte Elemente nach DIN EN ISO 1101.....	62
Abbildung 2.40 Beispiel einer linearen Maßkette mit Funktionsmaß $M_0$ .....	62
Abbildung 2.41 Vergleich VDI 2221 mit Toleranzmethode nach [Bohn, Hets2] .....	65

---

Abbildung 2.42 Leitfragen zur Klärung funktionaler Zusammenhänge nach [Bohn, Hets2] ...	66
Abbildung 2.43 Wahl von Bezügen und Bezugsstellen nach [Bohn, Hets2] .....	68
Abbildung 2.44 Zergliedern der Gesamtfunktion Motorhaube, sowie Zuordnung von Bauteilen und .....	69
Geometrieelementen.....	69
Abbildung 2.45 Durchgängiges Bezugssystem einer Motorhaubenbaugruppe .....	71
Abbildung 2.46 Vergleich zwischen Einzelteiltoleranzen und Zusammenbautoleranzen .....	72
Abbildung 2.47 Schnittstellen eines Toleranzmanagers nach [Litw2], [Pors], [Lossn], .....	74
Abbildung 2.48 Modulstrategie und Zusammensetzung eines interdisziplinären Toleranzarbeitskreises .....	75
Abbildung 2.49 Aufgaben eines Toleranzmanagers im Produktentwicklungsprozess in Anlehnung an [Räse] .....	76
Abbildung 2.50 Entwicklung des Fugen- und Radienplans .....	77
Abbildung 2.51 Funktionsmaße an einem Karosserierohbau.....	77
Abbildung 2.52 Ausricht- und Fügekonzept eines PKW-Kotflügels .....	78
Abbildung 2.53 Graphische Darstellung der KKT-Bedingung für ein gleichungsrestringiertes Optimierungsproblem nach [Gerd] .....	89
Abbildung 2.54 Exemplarischer Gradientenverlauf bei einer Funktion mit einem Maximum	90
Abbildung 2.55 Graphische Darstellung der hinreichenden Bedingung zweiter Ordnung.....	92
existiert mit .....	92
Abbildung 2.56 Unterschied zwischen globalem und strikt globalem Minimum .....	93
Abbildung 2.57 Flussdiagramm ARSM in Anlehnung an [Wang, Dong, Aitc].....	97
Abbildung 2.58 Allgemeines Flussdiagramm für Naturanaloge Optimierung .....	98
Abbildung 2.59 Unterschied zwischen der evolutionären Strategie und dem genetischen Algorithmus .....	100
Abbildung 2.60 Neue Position eines Partikels nach einem Iterationsschritt [Dyna] .....	101

---

Abbildung 2.61 Leitfragen zur Optimierung im Bereich Toleranzmanagement in Anlehnung an [Bon, Hets2] .....	103
Abbildung 2.62 Eingangsparameter einer Toleranzsimulation.....	103
Abbildung 3.1 Abhängigkeiten der forschungsrelevanten Fragestellungen.....	105
Abbildung 4.1 Gesamtüberblick der Forschungsfragen im Kontext der Arbeit.....	115
Abbildung 4.2 Datennutzer der Fügefolge im Karosserierohbau .....	117
Abbildung 4.3 Nutzwertanalyse (nach VDI 2225) zur Auswahl eines geeigneten Formats für die Bereitstellung der Fügefolge .....	123
Abbildung 4.4 Domänenübergreifender Ansatz zur Produkt- und Produktionsentwicklung im Kontext des Produkt- sowie Anlagenlebenszyklus [Litw3] .....	124
Abbildung 4.5 Sichten (Rollen) im automobilen Umfeld .....	125
Abbildung 4.6 Topologiebeschreibung der AML in Bezug auf die digitale Fügefolge .....	126
Abbildung 4.7 Erforderliche Metadaten im PDM-System zur Darstellung der Fügefolge.....	127
Abbildung 4.8 Konzept zur Ableitung des Fügegraphen basierend auf Spann- und Fixiermetadaten .....	128
Abbildung 4.9 Funktionsmaßkatalog eingebettet in die Produktstruktur moderner PDM- Systeme .....	131
Abbildung 4.10 Nutzwertanalyse der Strukturkonzepte zur Bereitstellung von Qualitätsmerkmalen im digitalen Format.....	135
Abbildung 4.11 Methode zur Erstellung von Qualitätsmerkmalen .....	138
Abbildung 4.12 Schnittmodell eines Fahrzeugs .....	139
Abbildung 4.13 Definition von Messpunkten aus Schnittpunkten der Messschnitte und deren Bauteilen.....	140
Abbildung 4.14 Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den Produkt- und Produktionsentwicklungsdaten.....	144
Abbildung 4.15 Klassengerüst aus Sicht der Produkt- und Produktionsentwicklung zum Informationsaustausch mit der Toleranzsimulationssoftware .....	145

---

Abbildung 4.16 CAT-Simulation Modellierungsprozess .....	146
Abbildung 4.17 Klassengerüst aus CAT-Softwaresicht zum Informationsaustausch mit dem PDM-, CAD-System .....	147
Abbildung 4.18 Algorithmus zur Zuordnung der Informationen aus Produkt- Produktionsentwicklungsprozess in die Vorgaben aus Sicht der Toleranzsimulationssoftware .....	148
Abbildung 4.19 Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Informationen aus PDM- /CAD- System in Bezug auf die Optimierung .....	152
Abbildung 4.20 Klassengerüst der Datenbank zur Anbindung eines Optimierers an PDM-, CAD-System und CAT-Software .....	154
Abbildung 4.21 Abhängigkeiten der Informationen im Optimierungsprogrammsystem.....	155
Abbildung 4.22 Vereinfachte Klassenbibliothek eines Optimierers .....	156
Abbildung 4.23 Grundlegender Algorithmus zum Übertrag der Informationen aus dem PDM-, CAD- System und der Toleranzsimulationssoftware zum Optimierungstool .....	158
Abbildung 4.24 Matrix Organisationsform für Toleranzmanagement innerhalb des Karosserierohbaus.....	160
Abbildung 4.25 Entwicklungsprozess mit digitaler Fügefolge .....	162
Abbildung 4.26 Entwicklungsprozess SFK mit enthaltenen Metadaten .....	163
Abbildung 4.27 Ideale Systemlandschaft des vorgestellten Konzepts .....	166
Abbildung 5.1 Herausforderungen bei der Umsetzung des Konzepts in bestehenden Systemlandschaften .....	169
Abbildung 6.1 Konzept zur automatisierten Toleranzsimulationsmodellerstellung aus vorhandenen Produkt- und Prozessdaten .....	171
Abbildung 6.2 Zergliederung der InstanceHierarchy in die Teile Prozessstruktur sowie der dabei verwendeten Komponenten im zweiten Teil.....	172
Abbildung 6.3 Notwendige Attribute der AML zum Aufbau des Fügegraphen .....	173
Abbildung 6.4 Zuordnung der Bauteil ID zur Bauteilsachnummer .....	173
Abbildung 6.5 Klassenstruktur der Fügefolge .....	174

Abbildung 6.6 Hauptklasse <Fügefolge> .....	174
Abbildung 6.7 <parentchild> Klasse .....	175
Abbildung 6.8 Benennung der Funktionsgruppen .....	176
Abbildung 6.9 Exemplarischer Demonstratorumfang; Radeinbau vollständig.....	177
Abbildung 6.10 Exemplarische Montagesicht mit Funktionsmaßkatalogen in Siemens NX .	178
Abbildung 6.11 Mindestumfang der Strukturelemente bei der Tolerierung mit Siemens NX .....	179
Abbildung 6.12 Funktionsmaßelemente zur Tolerierung des Abstandes zweier Bohrungsachsen .....	179
Abbildung 6.13 Einbindung der Funktionsmaßstruktur in das Daimler Startpart .....	181
Abbildung 6.14 DQM_ID-Attribut der Feature Group “_DQM” .....	181
Abbildung 6.15 XML-Struktur Funktionsgruppen .....	182
Abbildung 6.16 Untergruppen der Feature Groups <i>_Externe_Referenzen</i> sowie <i>_Referenzen</i> aus der Strukturebene Eingabe.....	184
Abbildung 6.17 Untergruppen der Feature Groups <i>_Rohteil, _Bearbeitung</i> aus der Strukturebene <i>_Bauteil_Konstruktion</i> .....	185
Abbildung 6.18 Untergruppen der Strukturebene <i>_Ergebnisse_Informationen</i> .....	186
Abbildung 6.19 Baugruppe enthält das Bauteil Verbindungselemente (VE-ZB Seitenwand VST AU LI) .....	187
Abbildung 6.20 Abgelegte Schweißpunkte in der zugehörigen Feature Group .....	187
Abbildung 6.21 Feature Groups innerhalb der Strukturebene <i>_PMI_Zusatzgeometrie</i> .....	188
Abbildung 6.22 PMI Informationen in der Model View <i>_Part_Tolerances</i> .....	189
Abbildung 6.23 Generelle Struktur der XML-Datenbank.....	191
Abbildung 6.24 Der Fügegraph innerhalb der XML-Datenbank.....	192
Abbildung 6.25 Punktinformationen innerhalb der XML-Datenbank.....	193
Abbildung 6.26 Toleranzinformationen innerhalb der XML-Datenbank .....	193
Abbildung 6.27 Zusammenbauoperationen in der XML-Datenbank.....	194



---

Abbildung 6.28 Parts und Geostationen in der XML-Datenbank.....	195
Abbildung 6.29 Messungen in der XML-Datenbank .....	195
Abbildung 6.30 Toleranzsimulation in der XML-Datenbank .....	196
Abbildung 6.31 Erstellung einer XML-Datenbank mithilfe der NX Open API .....	197
Abbildung 6.32 AML zur Darstellung des Fügegraphen in der XML-Datenbank .....	197
Abbildung 6.33 Zwischenformat der Fügefolge in C# nach Aufspaltung der AML Rolle .....	198
Abbildung 6.34 Definition von Qualitätsmerkmalen für die spätere 3D-Toleranzsimulation	199
Abbildung 6.35 der Flächenkoeffizient <i>Arel, proj</i> .....	201
Abbildung 6.36 Der Dreiecksverkippkoeffizient <i>VKD</i> .....	202
Abbildung 6.37 Abstandsberechnung und Gruppenbildung zur Ermittlung des <i>MPKD</i> .....	203
Abbildung 6.38 Globale Einstellmöglichkeiten der Software zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen .....	207
Abbildung 6.39 lokale Einstellmöglichkeiten der Software .....	207
Abbildung 6.40 Export oder Batch-Call des aufgebauten Toleranzsimulationsmodells.....	208
Abbildung 6.41 Demonstrator: „ Zusammenbau Heckmittelstück unten“ zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen .....	209
Abbildung 6.42 Fügegraph des Heckmittelstückmodells.....	209
Abbildung 6.43 Punktauswahl für Zusammenbauoperation 1 .....	210
Abbildung 6.44 Punktauswahl für Zusammenbauoperation 3 .....	211
Abbildung 6.45 Punktauswahl für Zusammenbauoperation 4 .....	212
Abbildung 6.46 Punktauswahl für Zusammenbauoperation 6 .....	213
Abbildung 6.47 Punktauswahl für Zusammenbauoperation 7 .....	213
Abbildung 6.48 Standardabweichungen gegenüber CAD-Solllage des „Zusammenbau Heckmittelstück unten“ .....	215
Abbildung 7.1 Einbindung des Optimierungsprogrammsystems in den Tolerizer .....	216
Abbildung 7.2 Parameterselektion in der XML-Datenbank .....	218

---

Abbildung 7.3 Modifizierte Bereiche der XML-Datenbank zur Variationsanalyse, Optimierung .....	219
Abbildung 7.4 Punktwolke einer Bezugsstelle mit gültigen und ungültigen Punkten .....	220
Abbildung 7.5 Einstell- und Eingriffsmöglichkeiten während der Durchführung von Variationsanalysen bei Toleranzsimulationsmodellen .....	221
Abbildung 7.6 Softwareinterner Ablauf der Variationsanalyse .....	222
Abbildung 7.7 Initiale Einstellmöglichkeiten beim Durchführen von Optimierungen.....	223
Abbildung 7.8 Parameter im Optimierungsbeispiel „Zusammenbau Heckmittelstück unten“ .....	224
Abbildung 7.9 Messungen zur Optimierung am „Zusammenbau Heckmittelstück unten“ ..	225
Abbildung 7.10 Optimierungsergebnisse am Beispiel „Zusammenbau Heckmittelstück unten“ .....	226
Abbildung 8.1 Optimierung von Anbindungskonzepten in frühen Entwicklungsphasen .....	233

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Überblick der zu setzenden Messpunkte .....	57
Tabelle 2.2 Relevante Normen im Toleranzmanagement Karosserierohbau.....	60
Tabelle 2.3 Auszug der gängigen Toleranzen im Karosserierohbau, sowie zugehörige Allgemeintoleranzen [MBN 36012] [MBN 10273] .....	73
Tabelle 2.4 Zusammenhang $cpk$ - Streuungsweitenfaktor $u, ui$ nach /5/ .....	102
Table 2.5 Optimierungsansätze mit Bezug auf das Toleranzmanagement .....	104
Tabelle 6.1 Der Dreieckskorrekturfaktor $kD$ .....	201
Tabelle 6.2 Der Streckenkorrekturfaktor $kS$ .....	204
Tabelle A1 AHP-Kontingenztafel zur Anforderungsbewertung.....	248

## IV. Glossar

"_"-Freigabe	Serienfreigabe
3DCS	Toleranzanalysesoftware der Firma DCS
AML	Automate Markup Language
API	Anwendungsprogrammierungsschnittstelle
ARSM	Advanced Response Surcafe Model
ASME	American Society of Mechanical Engineers
B-Fzg.	Bestätigungsfahrzeug
BOM	Bill of Materials
C++	Programmiersprache
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Machining
CAP	Computer Aided Production
CAQ	Computer Aided Quality
CAT	Computer Aided Tolerancing
CATIA V5	CAD-System der Firma Dassault
Cax	Computer Aided x
CEE	Cross Enterprise Engineering
CeTol	Toleranzanalysesoftware der Firma Sigmetrix
CFD	Computational Fluid Dynamic
CIM	Computation Indepentent Model
CNC	Computerized Numerical Control
DB	Datenbereitstellung

---

DIN	Deutsches Institut für Normung
DOE	Design of Experiments
DPT-V	Digitaler Prototyp Versuch
DQM	Digitales Qualitätsmerkmal
DRM	Design Research Methodology
DTD	Dokumenttypdefinition
EDM	Engineering Data Management
E-Fzg.	Entwicklungsfahrzeug
ERP	Enterprise Resource Planning
ET	Einzelteil
EVA	Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe
FAT	Fahrertüre
FEM	Finite Elemente Methode
FF	Fügefolge
FML	Funktionsmaßkatalog
FTAs	Bezugsstellen
GD&T	Geometrische Bemaßung und Tolerierung
GPS	Geometrische Produktspezifikation
ID	Identifikationsnummer
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
Java	Programmiersprache
JIS	Japanese Industrial Standards
JSON	Java Script Object Notation

---

JT	Jupiter Tessellation Standard
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
LSL	Lower Specification Limit
LTR	Längsträger
MBN	Mercedes-Benz Norm
MDA	Model Driven Architecture
MDS	Mercedes-Benz Development System
MKS	Mehrkörpersysteme
MLM	Manufacturing Lifecycle Management
MPs	Messpunkte
NLPQL	Non-Linear Programming by Quadratic Lagrangian
NVH	Noise, Vibration, Harshness
OEM	Original Equipment Manufacturers
OMG	Object Management Group
OPT	Optimierungsprogrammssystem
OptiSLang	Optimierungssoftware der Firma Dynardo
PDM	Produktdatenmanagement
PEP	Produktentstehungsprozess
Perl	Programmiersprache
P-Freigabe	Produktionsfreigabe
PHP	Programmiersprache: PHP Hypertext Preprocessor
PIM	Platform Independent Model
PKW	Personenkraftwagen
PLM	Product Lifecycle Management
PM	Platform Model

---

PMI	Prozessmodell im Intranet
PMI	Process Manufacturing Information
PMP	Prozessmasterplan
PSM	Platform Specific Model
Python	Programmiersprache
QG	Quality Gate
QM	Qualitätsmanagement
RDO	Robust Design Optimierung
RSM	Response Surface Model
SAF	Strukturabsicherungsfahrzeug
SE	Simultaneous Engineering
SFK	Spann- und Fixierkonzept
SFKs	Spannstellen
SGML	Standard Generalized Markup Language
Siemens NX	CAD-System der Firma Siemens
Smaragd	PDM-Datenbank basierend auf Siemens Teamcenter
SOA	Service oriented architecture and application
SOMA	Service oriented modeling and architecture
SOP	Start of Production
SQP	Sequential quadratic programming
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
TM	Toleranzmanagement
Tolerizer	Software zur Kopplung von CAD/PDM, Toleranzanalysesoftware und Optimierungssystem
TOTE	Test-Operate-Test-Exit

Uds	User defined Punkte
UML	Unified Modeling Language
USL	Upper Specification Limit
VDI	Verband deutscher Ingenieure
Ves	Verbindungsstellen
VisVSA	Toleranzanalysesoftware der Firma Siemens
VKF	Vorderkotflügel
W-Freigabe	Werkzeugfreigabe
XML	Extensible Markup Language
YAML	Yet Another Markup Language
Z1, Z2, Z3	Aufbaustufen des Rohbaus
ZB	Zusammenbau



# 1 Einleitung

In diesem Kapitel wird eine kurze Einführung in die Problemstellung und den Hintergrund der Arbeit gegeben. Basierend darauf wird der Wirkungsbereich der Arbeit definiert und das Hauptziel, die zentrale Forschungsfrage formuliert. Anschließend wird die der Arbeit zugrundeliegende Forschungsmethodik erläutert, sowie eine Beschreibung der dazu erforderlichen methodischen Vorgehensweise erfolgen. Zudem findet sich hier ein Überblick über den Aufbau der Arbeit sowie eine Eingliederung der einzelnen Kapitel in die beschriebene Forschungsmethodik.

## 1.1 Problemstellung und Hintergrund

*Connected, Autonomous, Shared, Electric:  
Jeder einzelne dieser Punkte hat das Potential, unsere Industrie auf den Kopf zu stellen.  
Die wahre Revolution steckt allerdings in der Verknüpfung all dessen.*

(Dr. Dieter Zetsche)

Mit der im Jahr 2017 angekündigten Elektrooffensive der Daimler AG und der damit einhergehenden Investition im Bereich Antriebstechnik sowie Batterieentwicklung und Produktion zeichnet sich ein Wandel der Mobilität in den kommenden Jahren ab. Die bis zum Jahr 2022 angekündigten zehn Elektrofahrzeuge [www12] gilt es in das bestehende Portfolio sinnvoll zu integrieren, um den Anforderungen der Kunden gerecht zu werden. Die dadurch entstehende Steigerung an Derivatanzahl muss in der Fahrzeugentwicklung Berücksichtigung finden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf einer Verkürzung der Produktentwicklungszeit in Kombination mit der Nutzung digitaler Prototypen [www13]. Ziel ist eine gewerksübergreifende Abstimmung bereits in möglichst frühen Produktentwicklungsphasen. Dadurch können langwierige und kostenintensive Hardwareaufbauten zunehmend entfallen. Ein Werkzeug zur digitalen Absicherung von Aufbaukonzepten stellt dabei die Toleranzanalyse dar. Mit ihrer Hilfe lassen sich abweichungsbehaftete Systeme darstellen, wie sie im Serienproduktionsprozess vorliegen. Es können Aussagen hinsichtlich der Maßhaltigkeit von Bauteilen und Zusammenbauten gewonnen oder erforderliche Nacharbeitsquoten ausgewählter Umfänge (zur Zielerreichung) ausgewiesen werden. Die Tendenz zur Verkürzung der Entwicklungszeit fordert mehr und mehr eine Beschleunigung im Simulationsmodellbau. Bisherige Systeme und Methoden zum Simulationsaufbau erlauben hier kaum bis keine Automatisierung. Auch der Faktor Mensch stellt an dieser Stelle des

Entwicklungsprozesses ein Risiko dar (z. B. Übertragungsfehler beim Aufbau, fehlerhafte Annahmen bei der Modellbildung usw.). Die Durchführung von Konzeptstudien, wie sie in [www13] beschrieben ist, erscheint durch die fehlende Automatisierungsmöglichkeit im Bereich Toleranzanalyse aufwendig. Dies stellt ein gravierendes Problem bei der geforderten Reduzierung der Produktentwicklungszeit dar. Daraus resultiert das Spannungsfeld, in dem sich diese Arbeit bewegt. Es ist notwendig, einen integrierten Ansatz zur Optimierung von dünnwandigen Blechbauteilen im Karosserierohbau mithilfe von Toleranzsimulationen zu entwickeln.

## 1.2 Abgrenzung der Arbeit

Bei der Auslegung eines Fahrzeugs bildet die Karosserie neben dem Antrieb und dem Fahrwerk einen wesentlichen Bestandteil [Wall, Frei, Olsc]. Im Lauf der Jahre haben sich die Anforderungen an den Karosserierohbau eines Fahrzeuges stetig weiterentwickelt. Heute gliedern sich diese Anforderungen im Wesentlichen in die Submodule Funktion, Herstellung, Emotion, Umwelt und Betrieb [Springer].

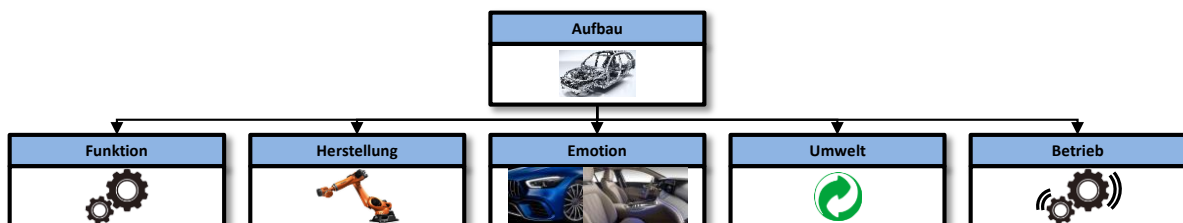


Abbildung 1.1 Anforderungen an den heutigen Karosserierohbau nach [Wall, Frei, Olsc]

Im Rahmen der Funktion des Rohbaus steht das Tragwerk im Mittelpunkt. Ein moderner Karosserierohbau trägt weit über 1000 Komponenten, welche oft geometrisch und funktional in Wechselwirkung stehen. Die Änderung oder Abweichung einer Komponente kann daher erhebliche Auswirkungen auf (angrenzende) andere Bauteile haben. Aufgrund der immer weiter steigenden Fahrzeugkomplexität sind diese Wechselwirkungen oft nicht mehr trivial nachvollziehbar. Zur Analyse dieser Wechselwirkungen, vor allem in Bezug auf die Maßhaltigkeit, kann die Toleranzanalyse als adäquates Mittel herangezogen werden. Dabei lassen sich Beiträge einzelner Mitglieder einer Maßkette im Hinblick auf eine Gesamtstreuung ableiten. Als Ergebnis solcher Analysen kann im Entwicklungsprozess an geometrisch kritischen Stellen durch das Einbringen von Ausgleichselementen (Langloch, Schiebeflansche

etc.) die Toleranzsituation entspannt werden. Dadurch kann bei der Montage die kostenintensive Nacharbeit im Fahrzeugaufbau verringert werden.

Durch die hochautomatisierte Karosserieherstellung ist der Rohbauproduktionsprozess an sich prädestiniert für den Einsatz von statistischen Methoden und Werkzeugen. Ferner sind Toleranzanalysemethoden hier aufgrund von langjähriger Erfahrung bekannt und mithilfe von Realmessdaten auch validiert. Die nachfolgende Arbeit bewegt sich deshalb im Umfeld dünnwandiger Blechbauteile des Karosserierohbaus.

### **1.3 Forschungsrelevante Fragestellungen**

Die angestrebte Reduzierung der Produktentwicklungszeit mithilfe der digitalen Prototypen und der Wunsch nach zunehmender Automatisierung zur Durchführung von Variantenstudien führen im Bereich des Toleranzmanagements für den Karosserierohbau zu der folgenden forschungsrelevanten Fragestellung, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet wird:

*Wie können Produkt- und Prozessdaten in der Karosserieentwicklung mit Hilfe von Toleranzsimulationen effizient optimiert werden?*

Eine detaillierte Aufschlüsselung dieser *zentralen Forschungsfrage* findet sich in Kapitel 3.

### **1.4 Angewandte Forschungsmethodik und methodisches Vorgehen**

Die angewandte Forschungsmethodik orientiert sich am nach [Bless] vorgegebenen Rahmenwerk für Forschungsaktivitäten aus dem Umfeld der Konstruktionsmethodik.

Im ersten Schritt gilt es, in diesem Rahmenwerk innerhalb der „Research Clarification“ messbare Kriterien für die vorliegende Forschungsaufgabe zu definieren. Anhand dieser Kriterien wird so die Güte der Forschung sichtbar. Typische Erfolgskriterien (höchste Ebene an messbaren Kriterien) stellen dabei Kriterien wie Gestehungskosten, Produktqualität, Prozessdurchlaufdauer sowie Produktionsdauer eines Produktes dar. Es ist üblich [Bless], aus diesen Erfolgskriterien leicht messbare Kriterien abzuleiten (z. B. Bauteilgewicht, Streuung von Nennmaßen, Taktzeit usw.). Bei prozessualen sowie methodischen Fragestellungen kommen hingegen Faktoren wie ein reibungsloser Prozessdurchlauf oder die Umsetzbarkeit der Methode in der Serienentwicklung in Betracht.

Im weiteren Verlauf der deskriptiven Studie erfolgt eine Analyse der Beitragsleistung dieser abgeleiteten Kriterien. Eine Beeinflussung dieser Beitragsleistung ermöglicht einen messbaren Erfolg und somit dienen diese als Basis zur Abarbeitung der Forschungsaufgabe. Dazu werden

die einzelnen Schnitte zur Beeinflussung der Beitragsleister in sogenannten Forschungsfragen verankert.

Innerhalb der präskriptiven Studie erfolgt die Erstellung von Konzepten und Methoden, um die zuvor aufgedeckten Defizite (z. B. hohe Beitragsleister der abgeleiteten Kriterien) zu beseitigen. Wichtig ist hier allerdings auch eine Bewertung der Methoden und Konzepte, basierend auf den zuvor definierten Einflussfaktoren.

Im Anschluss an diese Untersuchung erfolgt der zweite Teil der deskriptiven Studie. Dabei gilt es, die erarbeiteten Konzepte und Methoden in die industrielle Praxis anhand von konkreten Beispielen und Prototypen umzusetzen. Auch hier erfolgt basierend auf den zuvor definierten Einflussfaktoren die Validierung der erarbeiteten Konzepte und Methoden. Zur sukzessiven Optimierung und zur Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen sind Iterationen der einzelnen Phasen innerhalb der Forschung üblich und notwendig.

Das nachfolgende Kapitel zeigt den Aufbau der vorliegenden Arbeit nebst einer Zuordnung der Kapitel in die DRM nach [Bless].

## **1.5 Aufbau der Arbeit**

In Kapitel 1 der Arbeit finden sich die angewandte Forschungsmethodik sowie der Aufbau der Arbeit. Weiterhin erfolgen hier eine thematische Abgrenzung der Arbeit sowie die erste abstrakte Herleitung der zentralen Forschungsfrage.

In Kapitel 2 erfolgt die Zusammenfassung des aktuellen Stands der Forschung und Technik. Gleichzeitig bildet dieses Kapitel die Grundlage der in Kapitel 3 abgeleiteten Defizite und des daraus abgeleiteten Forschungsdesiderats; d.h. die „Research Clarification“. Diese Fragestellungen zergliedern sich in die Dimensionen Informationsbereitstellung, Methoden, Organisation (Prozess) und IT-Systeme, welche sich nach [Burr, Muel] bei der Analyse sowie die Synthese von ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen als geeignet erwiesen haben. Die messbaren Einflussfaktoren zu den einzelnen Aspekten der Forschungsfragen finden sich ebenfalls in diesem Kapitel (deskriptive Studie I).

Kapitel 4 bildet die präskriptive Studie. Es werden Konzepte und Methoden erarbeitet, um die vorliegenden Forschungsfragen zu beantworten, sodass über die abgeleiteten Einflussfaktoren ein messbarer Erfolg sichtbar wird. Dabei erfolgt eine Abarbeitung nach den

Domänen *Informationsbereitstellung, Methoden* und *Prozess*. Die erforderlichen Konzepte zur Beantwortung der systemtechnischen Umsetzung findet sich ebenfalls in Kapitel 4.

Kapitel 5 schlägt eine Brücke zwischen den wissenschaftlich erarbeiteten Konzepten und Methoden und ihrer Umsetzung in der industriellen Praxis. Es bildet damit den Übergang zwischen der präskriptiven Studie und der deskriptiven Studie II. Dabei werden die Herausforderungen bei der Umsetzung in bestehenden Systemlandschaften ausführlicher erläutert.

In Kapitel 6 und 7 erfolgt eine prototypische Umsetzung des Konzeptes anhand von Beispielen aus der industriellen Praxis. Die Ergebnisse werden mithilfe der Konzepte und Methoden anhand der aus Kapitel 3 definierten Einflussfaktoren validiert.

Das abschließende Kapitel 8 bietet neben der prägnanten Zusammenfassung der Forschungsergebnisse einen Ausblick auf weitere mögliche Forschungsaktivitäten.

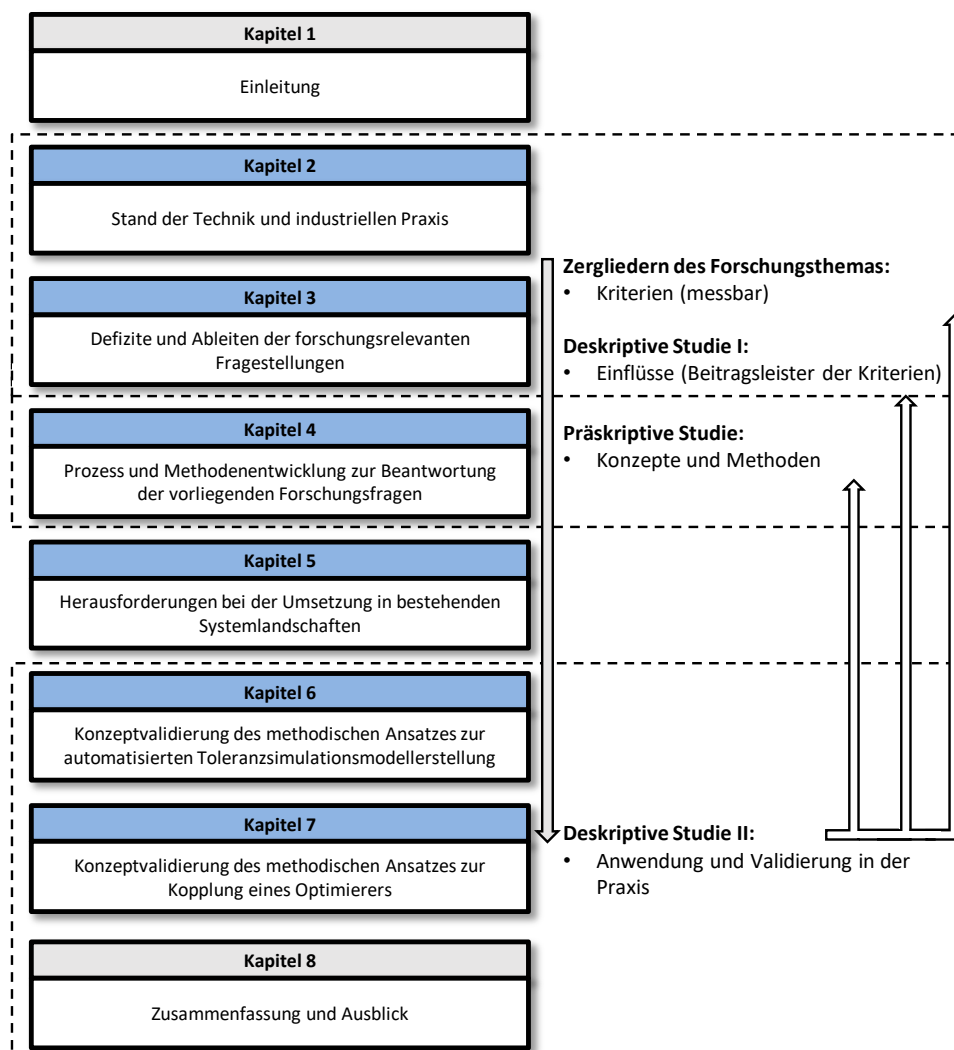


Abbildung 1.2 Aufbau der Arbeit



## 2 Stand der Technik und industriellen Praxis

Im diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik und Forschung zusammengefasst. Außerdem werden Einblicke in die industrielle Praxis gegeben. Dabei gliedert sich das Kapitel in vier Schwerpunkte: Produktentwicklung, Produktionsentwicklung, Toleranzmanagement und Variationsanalysen. Diese Punkte bilden die Basis zur Beantwortung der eingangs erwähnten zentralen Forschungsfrage. Zu Beginn jedes der vier Unterkapitel werden zunächst die Begrifflichkeiten (z. B. Produkt, Produktentwicklung) geklärt. Einhergehend damit werden Einblicke in derzeitige Organisationsformen (z. B. des Produktentwicklungsprozesses) gegeben. Auch Methoden und Vorgehensmodelle (z. B. im Produktentwicklungsprozess) werden erläutert.

### 2.1 Produktentwicklungsprozess im Automobilbau

*Die weltweite Nachfrage nach Kraftfahrzeugen wird eine Million nicht überschreiten  
-allein schon aus Mangel an verfügbaren Chauffeuren.  
(Gottlieb Daimler)*

Bei rund 3,21 Millionen PKW-Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2015 hat sich hier der Erfinder des PKWs offensichtlich geirrt [www01]. Mit der Erfindung des permanenten Fließbands durch Henry Ford und Charles E. Sorensen im Jahre 1913, konnte die Produktionskapazität auf ein Achtfaches des Ausgangswertes gesteigert werden. Die Massenproduktion nahm ihren Anfang. Der Personenkraftwagen wurde so für die breite Masse als Transportmittel erschwinglich [Ford]. Seit diesem Zeitpunkt hat sich das Produkt „Automobil“ ständig weiterentwickelt. Dies spiegelt sich nicht nur auf technischer und optischer Ebene wider, sondern lässt sich auf einer noch viel fundamentalere Ebene, wie der Begriffsdefinition des Produktes an sich feststellen.

#### 2.1.1 Begriffsverständnis Produkt und Produktentwicklung

Nach [Homb] versteht man unter einem Produkt „ein Bündel von Eigenschaften, das auf die Schaffung von Kundennutzen (jedweder Art) abzielt.“ Dabei zergliedert sich der Produktbegriff in drei verschiedene Verständnisebenen:

- der substanzielle Produktbegriff:

Physikalisch-technische Eigenschaften bilden nach [Homb] das Kernprodukt, das darauf abzielt, primär die Kundenbedürfnisse durch reine funktionale Aspekte zu befriedigen.

- der erweiterte Produktbegriff:

Neben den rein physikalisch-technischen Eigenschaften erweitert sich hier der Produktbegriff um sogenannte immaterielle Leistungen (Dienstleistungen) [Homb]. Damit soll eine noch umfassendere Befriedigung der Kundenbedürfnisse erreicht werden, wobei der rein funktionale Kundennutzen auch hier dominiert. Im Vergleich zum substanziellen Produktbegriff kann allerdings auch eine teilweise oder ausschließlich immaterielle Leistung vorliegen. Das heißt eine reine Dienstleistung an sich wird im erweiterten Produktbegriff als Produkt verstanden.

- der generische Produktbegriff:

Dieser fasst den erweiterten Produktbegriff noch allgemeiner. Es werden sämtliche Eigenschaften zum Kernprodukt hinzugenommen, aus denen Kundennutzen resultiert. Damit schließt dieser Begriff emotionale oder soziale Eigenschaften mit ein. Das Produkt kann dabei Eigenschaften von Personen, Orte und Ideen umfassen.

Abbildung 2.1 zeigt die unterschiedlichen Produktbegriffe am Beispiel der Automobilindustrie. Es ist deutlich, dass neben dem zentralen Kernprodukt der Erfolg des selbigen durch die zusätzlichen Eigenschaften heute maßgeblich beeinflusst wird.

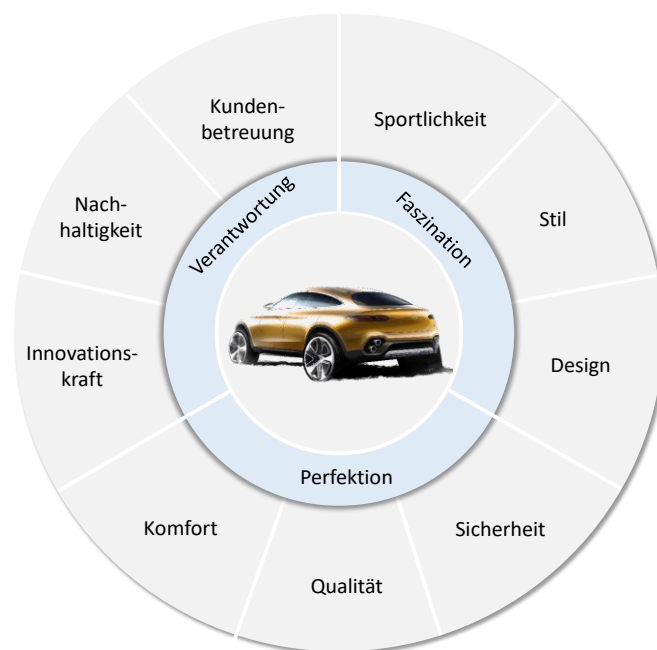


Abbildung 2.1 Zusätzliche Eigenschaften des Kernproduktes nach [www14]



Von der ersten Idee eines neuen Produktes bis zu dessen Serienfertigung muss eine Vielzahl an Tätigkeiten in der richtigen Reihenfolge, zum richtigen Zeitpunkt ausgeübt werden. Dabei kommen verschiedene Werkzeuge und Hilfsmittel zum Einsatz. Laut Definition [www02] versteht man unter einem Produktentwicklungsprozess die „Verbesserung vorhandener und Entwicklung sowie Erarbeitung neuer Produkte“. Dabei ist unter dem Produkt in erster Linie das Kernprodukt zu verstehen. Die funktionalen Anforderungen an das Produkt lassen sich basierend auf den Markenwerten (z. B. Insassenschutz), den Benchmark-Analysen (z. B. Verbrauch), auf Kundenbefragungen (z. B. Ergonomie) sowie auf globale Trends (wie z. B. Elektromobilität) zurückführen. Sind die grundlegenden funktionalen Anforderungen erfüllt, kann im Produktentwicklungsprozess auf zusätzliche immaterielle, emotionale und soziale Eigenschaften eingegangen werden.

Der Produktentwicklungsprozess bildet dabei den Kernbestandteil im Produktlebenszyklus, da dort die wesentlichen Eigenschaften des Produktes festgelegt werden. In frühen Entwicklungsphasen sind Änderungen der Konstruktion die Regel. Je höher der Detaillierungsgrad des Produktes ist umso wichtiger ist es Änderungen der Hardware zu vermeiden.

Kostenintensive Änderungen sind die Folge beim Auffinden von Fehlern in späten Entwicklungsphasen. Man spricht hier von der sogenannten Zehner Regel [Ehre, Meer] (vgl. Abb. 2.2)

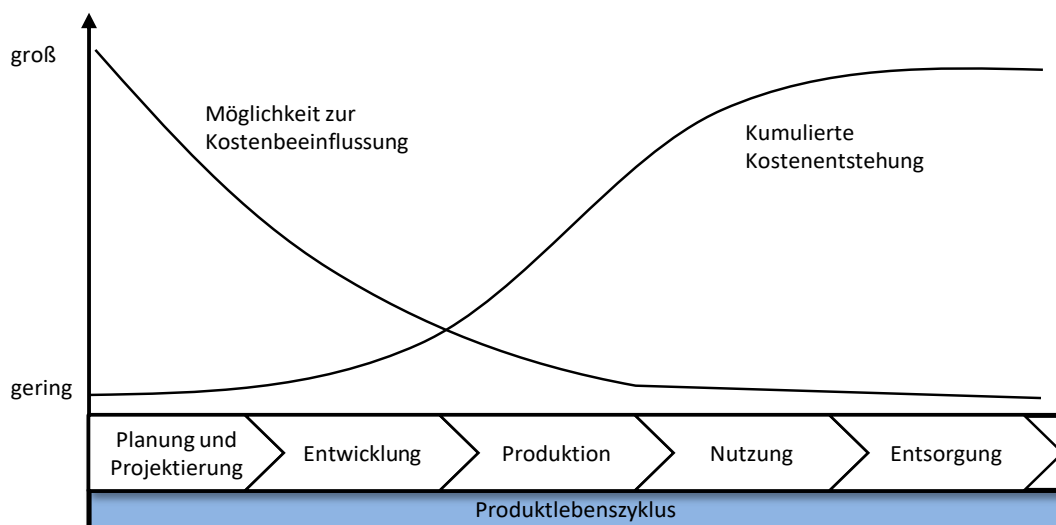


Abbildung 2.2 Zehner Regel in der Produktentwicklung nach [Ehre]

Der Produktentwicklungsprozess stellt nur einen Bruchteil des Produktlebenszyklus dar. Beginnend bei den ersten Designstudien zu einem neuen Modell bis hin zur Serienentwicklung des Produktes ergeben sich unzählige Herausforderungen, die in relativ kurzer Zeit zu bewältigen sind. Der ganzheitliche Entwicklungsprozess endet dabei keinesfalls mit dem Verkauf des Produktes. Er umfasst auch Aufgaben wie Service und Wartung. Im Zuge des steigenden Umweltbewusstseins spielt auch das Ende des Produktlebenszyklus eine immer wichtigere Rolle. Eine einfache Demontage sowie ein hoher Anteil an recyclebaren Materialien stehen dabei im Mittelpunkt. Der Lebenszyklus eines Produkts lässt sich grob in die neun Phasen unterteilen (vgl. Abbildung 2.3).

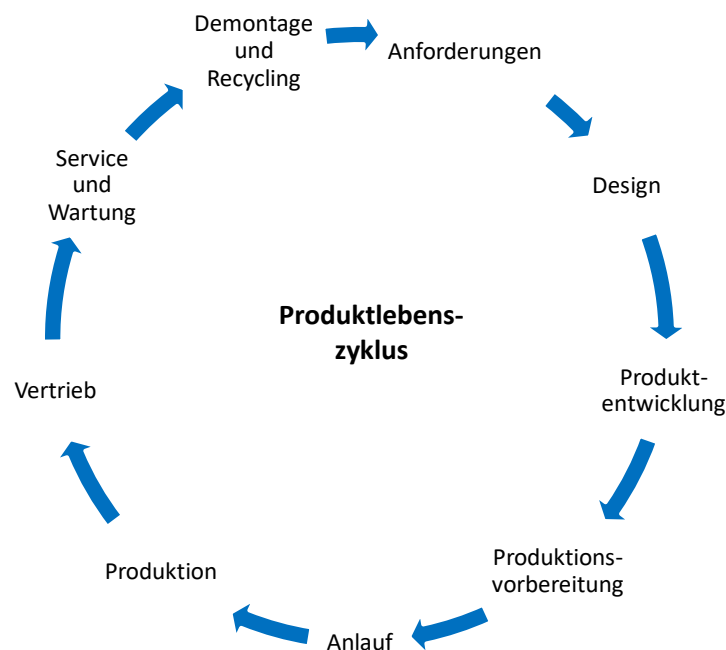


Abbildung 2.3 neun Phasen des Produktlebenszyklus in Anlehnung an [Ehre]

Für die zentrale Phase des Produktlebenszyklus, der Entwicklung, wurden im Laufe der Jahre Methoden und Vorgehensmodelle ausgearbeitet und weiterentwickelt. Diese untergliedern sich in die vier Hauptphasen: Planung, Konzeption, Entwicklung und Ausarbeitung. Dabei muss die Rationalisierung der Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit berücksichtigt werden (vgl. [Ehre, Meer].)

### 2.1.2 Methoden und Vorgehensmodelle

Hier werden zwei zentrale Methoden und Vorgehensmodelle der Produktentwicklung im Automobilbau näher betrachtet. Entscheidend für die Auswahl der Modelle ist die Möglichkeit der Übertragung auf den Bereich Toleranzmanagement.

### **2.1.2.1 Methode und Vorgehensmodell nach VDI 2221**

Eine strukturierte Herangehensweise bei der Produktentwicklung ist unabdingbar, um den Produktentwicklungsprozess sicher durchlaufen zu können. Das Fundament bildet dabei die VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221]. Diese dient als Wegweiser für zahlreiche Methoden und Vorgehensmodelle der Produktentwicklung. Innerhalb der Richtlinie sind allgemeingültige, branchenübergreifende Methoden des Entwickelns und Konstruierens definiert. Zudem bringt diese Richtlinie eine gewisse Ordnung in die über die Jahre entstandenen Vorgehensweisen und Methoden. Diese Richtlinie bildet die sogenannte Dachrichtlinie. Weitere detailliertere Beschreibungen zu den einzelnen Phasen, die nachfolgend beschrieben werden, finden sich in den Richtlinien [VDI2222], [VDI2223].

Die Richtlinie VDI 2221 beginnt bei der Planungsphase, in der das Markt- und Unternehmensumfeld analysiert werden. Basierend auf den Ergebnissen werden Produktideen entwickelt und Anschluss Produktvorschläge formuliert. Für einen Vorschlag gilt es, sämtliche zu Verfügung stehenden Informationen zusammenzutragen und auf etwaige Lücken hin zu prüfen. Erst dann kann die konkrete Aufgabenstellung formuliert werden. Den Abschluss der ersten Phase bildet eine vollständig ausgearbeitete Anforderungsliste, die sich aus internen (z. B. Markenwerte) sowie externen Anforderungen (z. B. Kundenbedürfnisse) zusammensetzt.

In der anschließenden Konzeptphase werden basierend auf der Anforderungsliste eine Hauptfunktion sowie einzelne Subfunktionen abgeleitet. (Haupt- und Subfunktionen aus Sicht des Toleranzmanagements finden sich in Kapitel 2.3.3.) Verknüpfungen von verschiedenen Funktionen, z. B. bei komplexeren Wirkprinzipien mit Energie-, Stoff- und Signalflüssen, müssen innerhalb der Funktionsstruktur festgehalten werden. Mögliche Lösungsprinzipien zu den einzelnen Subfunktionen gilt es zudem, in einer Wirkstruktur zu notieren. Damit ist die Darstellung der Funktionserfüllung von Teilfunktionen basierend auf der Wirkstruktur möglich.

Die Entwurfsphase dient dazu, die prinzipiellen Lösungen in realisierbare Module zu gliedern (Modulstruktur). Dadurch lässt sich der Bearbeitungsaufwand der Module besser abschätzen; ferner werden Schnittstellen sichtbar. Weiterhin werden bereits in der Entwurfsphase für die maßgebenden Module Vorentwürfe ausgearbeitet. Diese werden dann schrittweise

spezifiziert und durch fehlende Entwürfe für weitere Module ergänzt. Schlussendlich kann in einer Zusammenfassung der Gesamtentwurf des Produktes dargestellt werden.

Die vierte Phase bildet die Ausarbeitung des Gesamtentwurfs, wobei oftmals eine Überlappung zur vorhergegangenen Phase vorliegt, da fertigungstechnische Aspekte bereits in der Entwurfsphase Berücksichtigung finden. Als Arbeitsergebnis liegt schließlich eine vollständige Produktdokumentation vor. Abbildung 2.4 zeigt das Vorgehensmodell der Produktentwicklung nach VDI 2221.

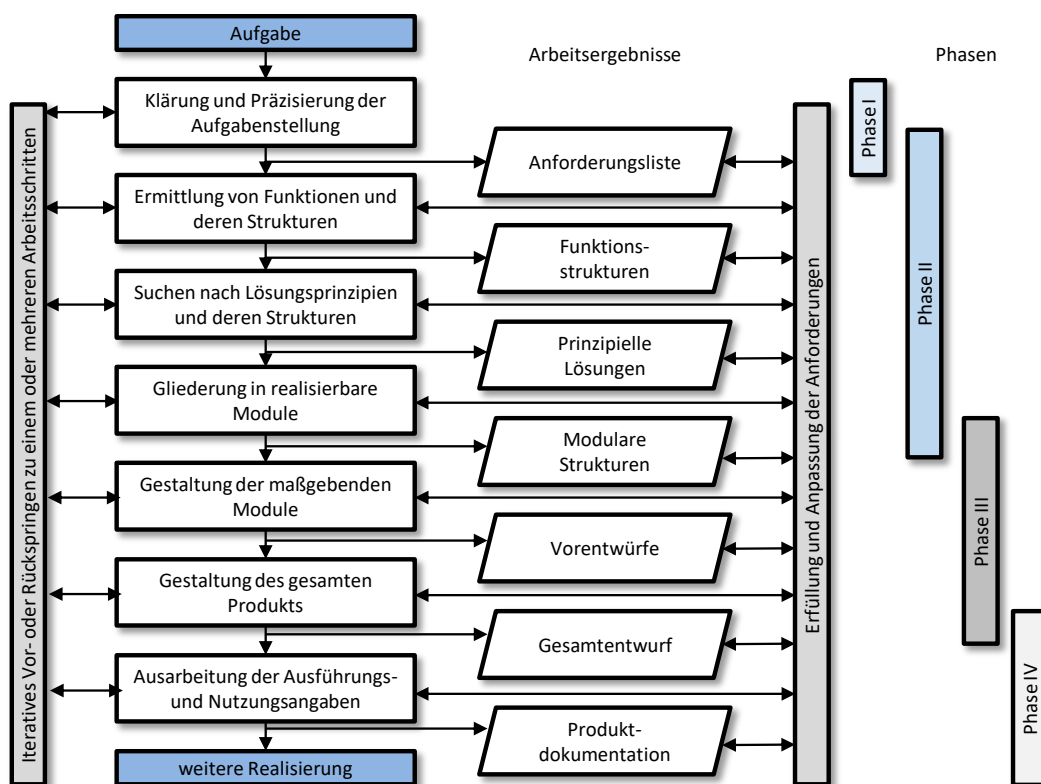


Abbildung 2.4 Entwicklungsprozess nach VDI 2221 [VDI2221]

### 2.1.2.2 Methode und Vorgehensmodell nach VDI 2206

Zur domänenübergreifenden Entwicklung von mechatronischen Systemen steht die VDI 2206-Richtlinie bereit. Diese ergänzt die Dachrichtlinie VDI 2221 und wird im Hinblick auf das automobilen Umfeld der vorliegenden Arbeit gesondert erwähnt. Eine weitere Detaillierung findet sich in VDI 2422, welche die Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik beschreibt. Grundsätzlich gliedert sich die hier erwähnte Methodik in drei Teile: Im Mikrozyklus erfolgt zunächst eine Situationsanalyse bzw. Zielübernahme. Dabei wird entweder das zu erreichende Ziel übernommen und mit einer Situationsanalyse fortgeföhren

(Soll-Zustandsorientiertes-Vorgehen). Falls jedoch eine unklare Situation vorliegt, wird diese zunächst analysiert und dann das zu erreichende Ziel selbstständig formuliert (Ist-Zustandsorientiertes-Vorgehen). Im Anschluss daran erfolgt ein Wechselspiel aus Analysen und Synthesen, um das Problem zu lösen. Dies kann bewusst sowie unterbewusst erfolgen. Ist eine Problemlösung gefunden, muss diese im nachfolgenden Schritt einer kritischen Bewertung anhand der an das Ziel gestellten Anforderungen unterzogen werden. Mit der Entscheidung erfolgt die Festlegung, ob die erarbeitete Lösung zielführend ist. Wenn dies nicht der Fall ist, erfolgt eine Iteration. Der Mikrozyklus endet mit der Planung des weiteren Vorgehens. Abbildung 2.5 zeigt diesen Mikrozyklus nach [Daen].

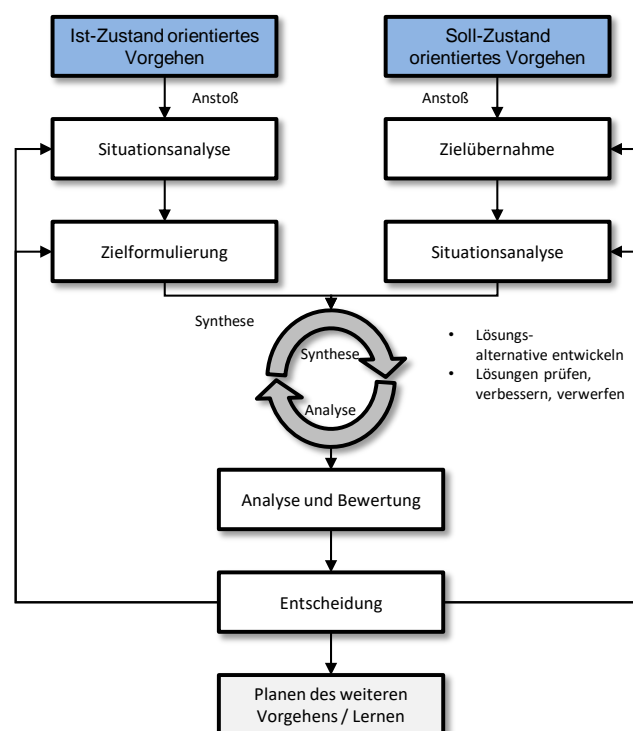


Abbildung 2.5 Mikrozyklus zur Problemlösung nach [Daen]

Auf der makroskopischen Ebene hilft das V-Modell als Vorgehensmodell. Hierbei resultieren die Anforderungen aus der konkreten Formulierung der Aufgabenstellung. Die spätere Bewertung der erarbeiteten Lösung erfolgt anhand dieser Anforderungen. Im Systementwurf wird ein Lösungskonzept erarbeitet, das domänenübergreifend die physikalischen, mechanischen und informationsverarbeiteten Wirkungsweisen des zukünftigen Produktes logisch beschreibt. Eine Zergliederung der Funktionsweise analog VDI 2221 in Teilfunktionen ist dabei gängig. Anschließend erfolgt die Gliederung der Funktionen in die einzelnen Domänen. Hier kann mit der Bearbeitung der fachspezifischen Aufgaben begonnen werden. Durch Berechnungs- und Simulationsverfahren wird hierbei sichergestellt, dass auch kritische

Funktionen im erarbeiteten Lösungskonzept funktionieren. Die Zusammenführung der domänenspezifischen Entwürfe erfolgt in der Systemintegration. Durch die Eigenschaftsabsicherung erfolgt eine permanente Kontrolle, ob die eingangs definierten Anforderungen mit den tatsächlich erarbeiteten Systemeigenschaften übereinstimmen. Dies erfolgt durch geeignete rechnergestützte Werkzeuge und Methoden. Ergebnis solcher wiederholter Prozessdurchläufe stellt ein reifes Produkt dar. Im Automobilbau sind innerhalb der Hauptentwicklungsphase bis zu fünf Durchläufe mit verschiedenen Schwerpunkten gängige Praxis. Hierbei wird zwischen Absicherungsfahrzeugen, digitalem Prototyp-Versuch, Entwicklungsfahrzeugen, Bestätigungsfahrzeugen sowie serienreife Fahrzeuge unterschieden. Abbildung 2.6 zeigt den Makrozyklus aus VDI 2206.

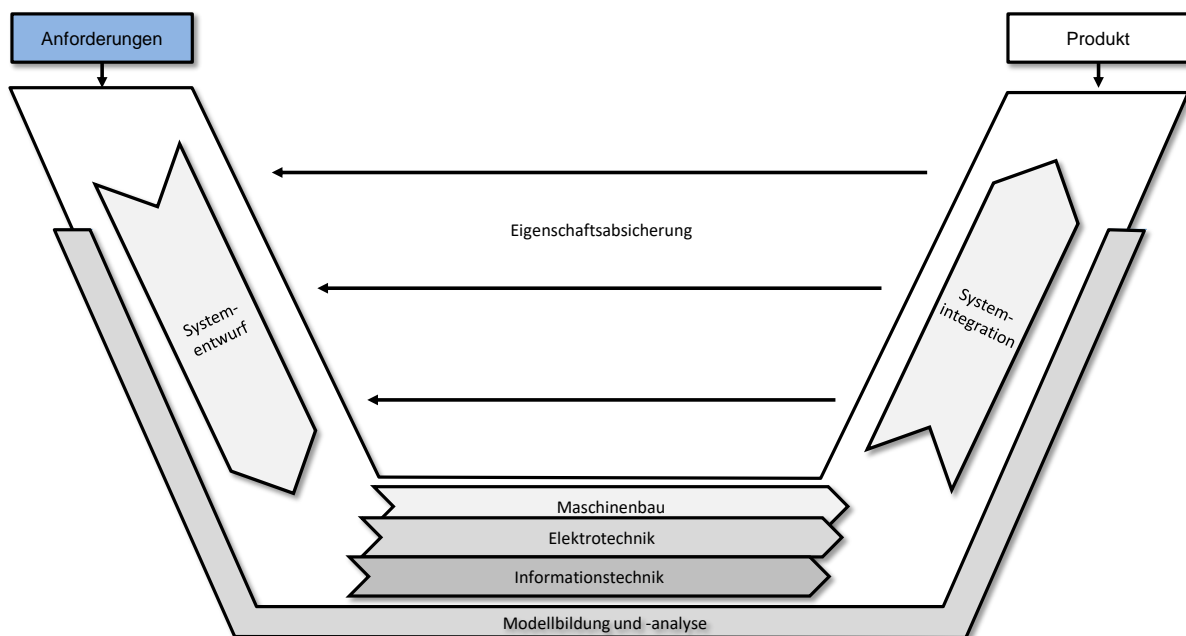


Abbildung 2.6 V-Modell für makroskopische Systeme nach [VDI2206]

Prozessbausteine für wiederholende Arbeitsschritte bilden innerhalb der Richtlinie die Aspekte Systementwurf, Modellbildung und Analyse domänenspezifischer Entwürfe, Systemintegration und Eigenschaftsabsicherung. Exemplarisch werden die Bausteine für den Systementwurf sowie die Systemintegration erläutert.

### Systementwurf

Die Abstraktion der Anforderungen aus der Anforderungsliste bildet den Ausgangspunkt. Es ist notwendig, sich von etwaigen Einschränkungen zu lösen und das Problem so allgemeingültig wie möglich zu formulieren. Darauf aufbauend muss die Gesamtfunktion des Systems dargestellt werden. Diese basiert auf Zielgrößen, die es zu erreichen gilt

(Ausgangsgrößen) sowie Eingangsgrößen, mithilfe derer die Zielgrößen erreicht werden müssen. „Durch allgemeine Flussgrößen wie Stoff, Energie und Information und der Blockdarstellung können die Zusammenhänge zwischen“ diesen Größen dargestellt werden [VDI2206]. Durch ein Zergliedern des Gesamtsystems in Teilfunktionen - unter Berücksichtigung eines dennoch konsistenten Flusses - kann dieses auf einer mikroskopischen Ebene zerlegt werden, sodass eine Bearbeitung erfolgen kann. Die Suche nach geeigneten Wirkprinzipien zur Problemlösung der Elementarfunktionen erfolgt dabei beispielsweise mithilfe von Konstruktionskatalogen. Zur Erfüllung der Gesamtfunktion des Systems erfolgt eine Verknüpfung der Wirkprinzipien zur sogenannten Wirkstruktur. Die Konkretisierung hinsichtlich störungsfreiem Fluss (überschlägige Dimensionierung der Geometrien etc.) führt zur Baumstruktur des Systems. Darin werden räumliche Zusammenhänge, Anforderungen der Herstellbarkeit und Montage, verwendete Verbindungstechniken sowie generelle Ausrichtung der Bauteile und Baugruppen festgehalten. Das Toleranzmanagement als Bindeglied zwischen Design, Konstruktion und Serienproduktionsreife trägt hier eine wichtige Verantwortung, die in Kapitel 2.3 ausführlich erläutert wird. Eine funktionsgerechte Anordnung der Elemente sowie ihr korrektes Zusammenwirken erfolgt durch Stütz- und Hüllsysteme. Eine weitere Optimierung der Komponenten kann durch Gestaltungsprinzipien wie eine Integral- oder Differenzialbauweise erfolgen. Auch hier kommt dem Toleranzmanagement hinsichtlich der späteren Funktionserfüllung im Serienproduktionsprozess eine tragende Rolle zu. Innerhalb der Konkretisierung der ausgewählten Lösungsvarianten erfolgt eine weitere Detaillierung. Dabei kommen Berechnungsmethoden wie z. B. FEM (Finite Element Methode), MKS (Analyse von Mehrkörpersystemen) oder CAT (Computer Aided Tolerancing) zum Einsatz. Eine Bewertung der Lösungsvarianten hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Aspekte führt zu einem domänenübergreifenden Lösungskonzept. Abbildung 2.7 zeigt das detaillierte Vorgehen zum Systementwurf nach [Kall1], [Pahl, Beitz], [VDI2206].

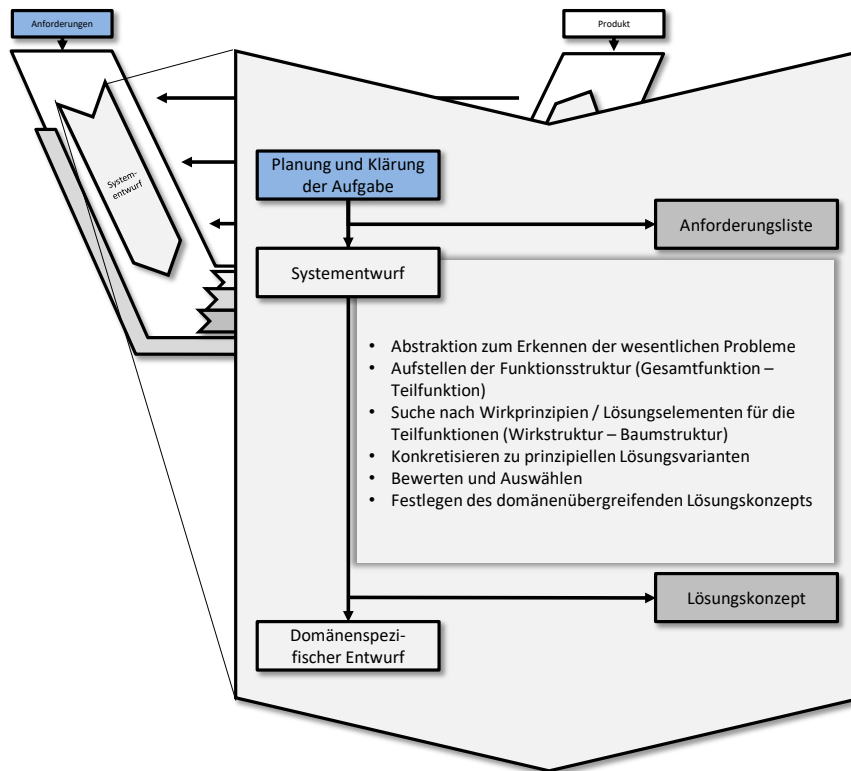


Abbildung 2.7 Systementwurf nach [Kall1], [Pahl, Beitz], [VDI2206]

### Systemintegration

Eine weitere Herausforderung bei der Entwicklung mechatronischer Produkte stellt die Systemintegration der domänenspezifischen Lösungen dar. Es wird prinzipiell zwischen drei Integrationsverfahren unterschieden [Kall2]:

- Integration verteilter Komponenten:  
Dabei müssen verschiedene, im Produkt verteilte Komponenten wie Aktoren und Sensoren miteinander verbunden werden, um den Energie- und Signalfluss gewährleisten zu können. Hierbei finden Serienkomponenten wie Steckverbindungen und Kabel Einsatz.
- Modulare Integration:  
Das System besteht aus unterschiedlichen Modulen, um die verschiedenen Funktionen zu gewährleisten. Die Verbindung dieser Module erfolgt mithilfe von genormten Steckverbindungen; beispielsweise auf der elektrotechnischen und informationstechnischen Seite. Auf der mechanischen Seite stehen eine Vielzahl von Maschinenelementen für stoff-, kraft- oder formschlüssige Verbindungen zur Verfügung.
- Räumliche Integration



Die räumliche Integration aller Komponenten des Produktes führen zu einer komplexen Funktionseinheit (z. B. Fahrzeug). Dies bringt Vorteile wie einen optimal genutzten Bauraum, große Zuverlässigkeit der Komponenten (z. B. kurze Energieversorgungswege) oder geringen Montageaufwand mit sich. Jedoch treten hier unter Umständen auch negative Eigenschaften auf: Streufelder, Schwingungen von Komponenten, Scheuern und dadurch Korrosion oder Engstellen durch Fertigungsschwankungen von Komponenten und Bauteilen. Gerade in dieser Phase kommen durch den Einsatz des Toleranzmanagements während des Systementwurfs und der Feindimensionierung positive Effekte zum Tragen. Hierzu müssen zwingend Inkompatibilitäten, wie sie durch eine veränderte Wirkstrukturen während der Feindimensionierung in den Fachdomänen entstehen können, in der Systemintegration erkannt und eliminiert werden. Abbildung 2.8 zeigt die Systemintegration nach [VDI2206].

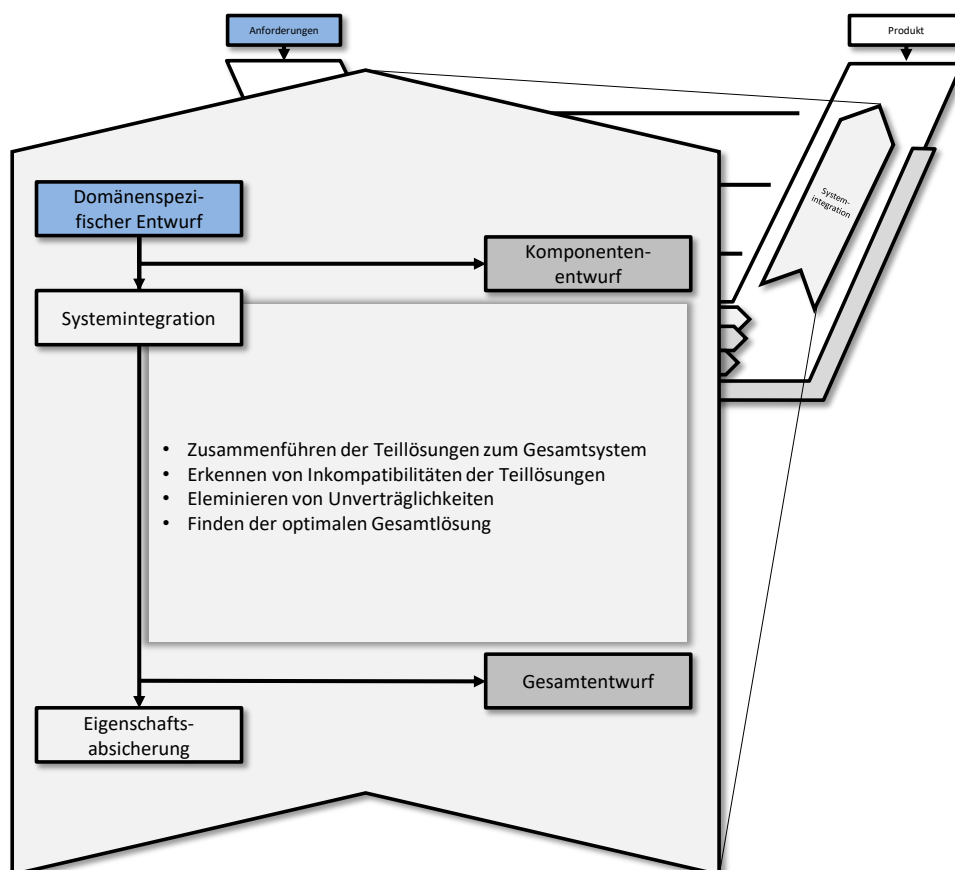


Abbildung 2.8 Systemintegration nach VDI 2206 [VDI2206]

### 2.1.3 Organisation des Produktentwicklungsprozesses

Ein großer Nachteil der beiden erwähnten Methoden der Produktentwicklung (VDI 2221 und VDI 2206) ist die zu stark sequenzielle Ausprägung. Zudem lassen sich diese vorzugsweise auf Neuentwicklungen anwenden. Eine Vorgehensweise für Änderungs- und Anpassungskonstruktionen beschreiben diese Methoden nicht. Gerade in der Automobilindustrie müssen bei der Fahrzeugentwicklung viele Aufgaben und Probleme parallel gelöst werden. So muss neben dem Produkt auch der Herstellungsprozess (Produktionsanlagen etc.) entwickelt werden. Ein sequenzieller Ablauf bei der Entwicklung ist aufgrund des Zeitaufwands und den damit einhergehenden Kosten nicht tragbar. Auch Ansätze zum Simultaneous Engineering (SE) stoßen hier an ihre Grenzen. Zum besseren Verständnis wird an dieser Stelle das Simultaneous Engineering definiert „Unter der integrierenden Vorgehensweise des Simultaneous Engineerings versteht man die zielgerichtete, interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit von Produkt-, Produktions-, und Vertriebsentwicklung mit Hilfe eines straffen Projektmanagements, wobei der gesamte Produktlebenslauf betrachtet wird.“ [Ehre]

So lässt sich der Produkterstellungsprozess verkürzen. Abbildung 2.9 verdeutlicht die matrixartige Struktur der Organisation des Simultaneous Engineering.

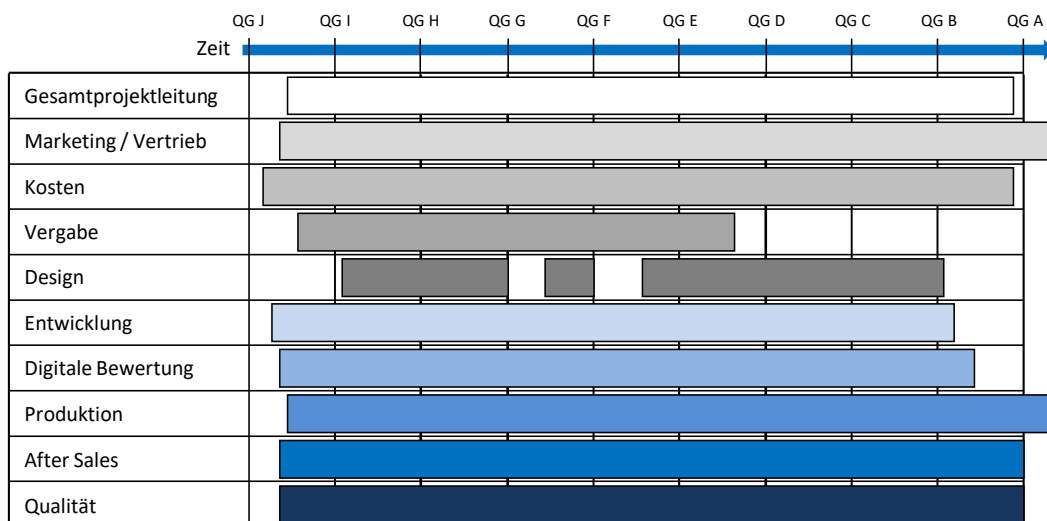


Abbildung 2.9 Organisationsmatrix im Fahrzeugbau bei Simultaneous Engineering in Anlehnung [Ehre]

Simultaneous Engineering berücksichtigt dabei lediglich unternehmensinterne Prozesse. Für global agierende Unternehmen müssen jedoch weitere Aspekte im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Das Simultaneous Engineering lässt sich jedoch in ein Cross Enterprise Engineering (CEE) überführen. „CEE bedeutet, dass Teile, Baugruppen, Komponenten und

Systeme über örtliche, unternehmerische und systemtechnische Grenzen hinweg geplant und entwickelt werden. Die Kommunikation und der Informationsaustausch findet dabei zunehmend über das Intra- bzw. Internet statt“ [Eign, Stel]. Abbildung 2.10 zeigt das Organisationschema bei der Verwendung von Cross Enterprise Engineering.

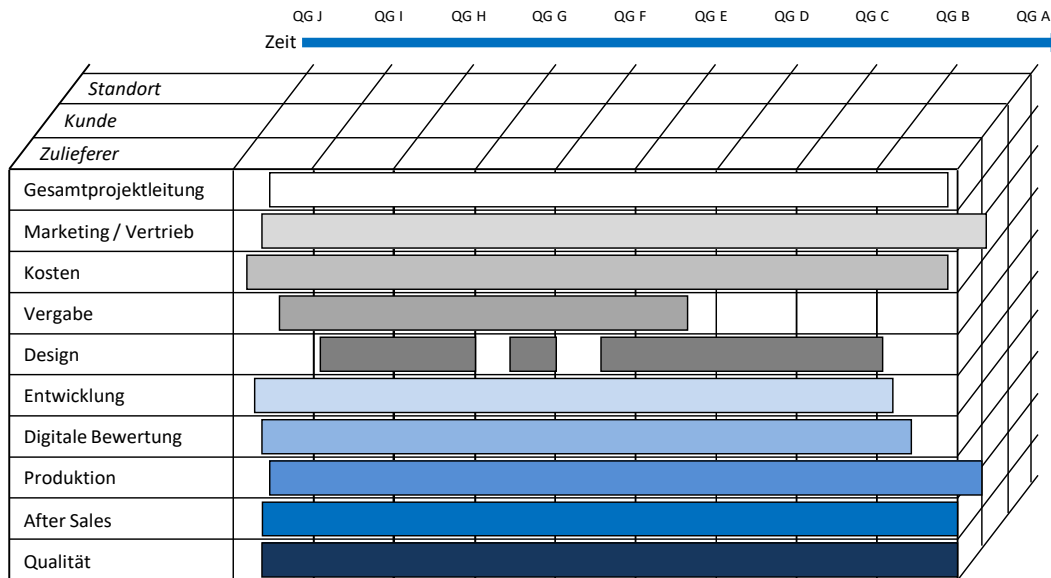


Abbildung 2.10 Organisation bei Cross Enterprise Engineering in Anlehnung an [Ehre]

Innerhalb global agierender Unternehmen haben sich im Lauf der Zeit eigenständige Produktentwicklungsmodelle (oft angelehnt an Cross Enterprise Engineering) etabliert. Exemplarisch ist hier das Produktentwicklungsmodell der Daimler AG genannt, welches die übergreifenden Prozesse innerhalb der Forschung und Entwicklung darstellt. Dieses „Prozessmodell im Intranet“ (PMI) enthält allgemeingültige und directionsübergreifende Inhalte (siehe Abbildung 2.11).

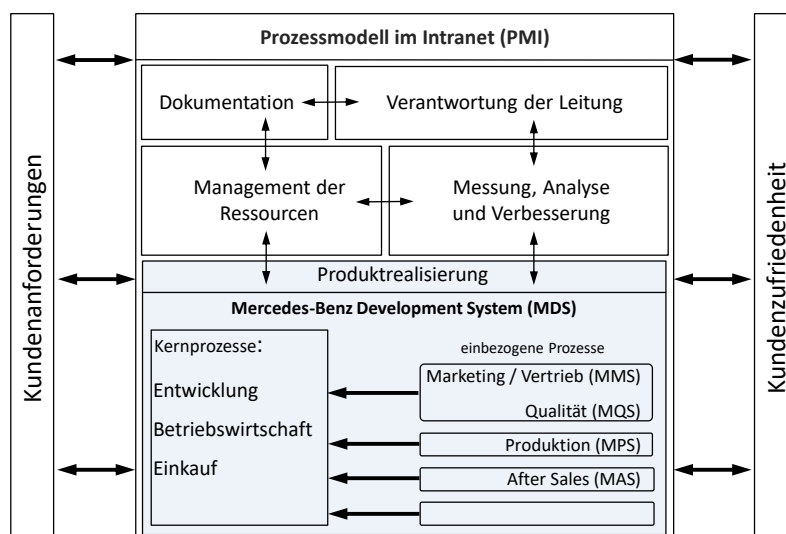


Abbildung 2.11 Prozessmodell im Intranet Daimler AG [Litw1]

Es bildet so das Qualitätsmanagement Handbuch ab und dient als Grundlage für die Zertifizierung und Auditierung nach DIN EN ISO 9001 ff. und ISO 16949. Weiterhin bildet es das zentrale Tool, in welchem qualitätsrelevante Dokumente beschrieben und visualisiert werden können. Im PMI eingebettet ist das Mercedes-Benz Development System (MDS), das zur Steuerung der Produktentstehung dient. Inhalte des MDS sind Standards für gemeinsame Terminologie, Methodik und Prozesse.

#### **2.1.4 Beispiel eines Produktentwicklungsmodells im Automobilbau**

Im folgenden Kapitel wird exemplarisch das Produktentwicklungsmodell der Daimler AG beschrieben (MDS).

##### **2.1.4.1 Mercedes-Benz-Development-System und strukturierende Elemente des Produktentwicklungsprozesses**

Das MDS beinhaltet eine Vielzahl von standardisierten Prozessen, Methoden, IT-Systemen und Dokumenten zur Projektplanung und -steuerung. Im Kern des MDS steht der Produktentstehungsprozess (MDS-Standardprozess) für Fahrzeugprojekte und die Synchronisation mit der Entwicklung des Antriebsstrangs (MDS-Powertrain). Die MDS-Prozessfamilie unterscheidet dabei zwischen dem MDS-Cluster-Lead für Neuentwicklungen mit hohem Innovationsgrad und dem Derivate für Neuentwicklungen mit hohem Übernahmeanteil aus bestehenden Projekten. Der MDS-LifeCycle hingegen zielt auf Modellpflege oder jährlich laufende Änderungen in der Serie ab. Für Antriebsstrang-Projekte (Motoren und Getriebe) gibt es eigenständige MDS-Prozessbeschreibungen. Die nachfolgenden Erläuterungen zum MDS beziehen sich auf den MDS-Lead.

Bei der Anwendung des MDS auf ein Produktprojekt wird der Standardprozess im Rahmen der möglichen Freiheitsgrade an die speziellen Anforderungen des Produkts angepasst (z. B. bei geringer Fertigungstiefe) und es erfolgt die Zuordnung der Verantwortung der Projektorganisation. Der Produktentstehungsprozess innerhalb des MDS wird durch sogenannte Quality Gates (Q-Gates) in zehn Prozessphasen gegliedert. Diese dienen als Checkpoints für die Qualitätskontrolle (Q-Gate J bis Q-Gate A). Beim Durchschreiten der Quality Gates findet eine Synchronisierung zwischen den am Produktentstehungsprozess beteiligten Abteilungen statt. Der Projektstatus wird durch festgelegte Standards bewertet und dokumentiert. So lassen sich der Projektfortschritt und der Reifegrad des Produkts

beurteilen. Innerhalb des Entwicklungsprozesses, d.h. beim fortlaufenden Durchschreiten der Q-Gates, werden die verschiedenen Teilprojekte immer weiter zusammengeführt, wodurch letztendlich das Gesamtprojekt (analog der Systemintegration nach VDI 2206) entsteht. Die Q-Gates berücksichtigen dabei grundsätzlich die Zielkomponenten, Kriterien und Ergebnisse. Die Zielkomponenten liefern Informationen, welche das Management benötigt, um valide Projektentscheidungen zu treffen. Die Zielkomponenten sind vorab zu formulieren, sodass die beteiligten Abteilungen die benötigten Informationen zum Q-Gate Termin bereithalten. Zielkomponenten für folgende Q-Gates werden zudem an diesen Terminen formuliert. Die Kriterien werden nach erforderlichen und wünschenswerten Anforderungen unterteilt, um so die Grundlagen für die Entscheidung des Managements zu bilden. Die Kriterien werden in einer standardisierten Liste festgehalten und können sich von Gate zu Gate leicht verändern. Es wird dabei zumeist zwischen finanziellen und qualitativen Kriterien zu unterscheiden. Die an den Q-Gates erreichten Ergebnisse werden konkret formuliert. Darin müssen Entscheidungen, welche aus Zielkomponenten getroffen werden und die Richtung, die das Projekt zukünftig einschlagen soll [Coop], enthalten sein.

Die wesentlichen Kriterien der einzelnen *Q-Gates* aus dem MDS werden nachfolgend knapp formuliert.

Zum Projektstart (*Quality Gate J*) innerhalb der Strategieweise werden die Anforderungen an das Fahrzeug definiert (Markenwerte, angestrebte Innovationen, Modulstrategie des Fahrzeugs) und kritisch auf die Umsetzbarkeit geprüft. In diesem Rahmen entstehen auch erste Designvorschläge mithilfe von Tonmodellen. Abgeschlossen wird die Strategieweise durch ein widerspruchsfreies Konzeptheft in *Quality Gate I*. Die Ausgestaltung erfolgt durch die beteiligten Fachabteilungen und enthält die jeweiligen Zielkomponenten. Weiterhin liegen nach einigen Iterationen erste Maßkonzepte im CAD, sowie reale Modelle im Maßstab 1:4 vor. In der anschließenden Konzeptphase wird das Konzeptheft schrittweise in ein Lastenheft überführt. Zu *Quality Gate H* liegt so erstmals ein Fahrzeuglastenheft vor. Zudem werden 1:1 Modelle des Fahrzeugs erstellt, anhand derer die Festlegung auf ein Interieur- und Exterieur-Design innerhalb des *Quality Gates* erfolgt. Somit entsteht eine erste Arbeitsversion des Fugen- und Radienplans des Fahrzeugs (näheres dazu in Kapitel 2.3.3). Zum Passieren von *Quality Gate G* erfolgt eine erste rechnerische Absicherung der Plattform des digitalen Prototyp-Versuchs (DPT-V). In diese Simulation fließen auch schon Daten der Konstruktion ein,

welche aus den ersten Strak<sup>1</sup>-Daten des Designs entstanden sind. Schwerpunkte der Berechnung am DPT-V bilden das Exterieur samt Fahrzeugstruktur, der Powertrain, sowie das Fahrwerk. Dieses Gate leitet die Vorentwicklungsphase des Produkts ein. Nach erfolgreichem Abschluss der Absicherung durch die Simulation werden Strak-Daten für das erste Erprobungsfahrzeug (E-Fzg.) generiert.

Bei Quality Gate F wird das finale Fahrzeuglastenhefts freigegeben. Zudem erfolgt hier der Design-Freeze für Exterieur und Interieur (d.h. die Festlegung des endgültigen Erscheinungsbilds des Fahrzeugs). Somit ist der Abschluss der Vorentwicklungsphase erreicht und die Serienentwicklungsphase beginnt. Auf Basis dieses Freezes können erstmals Serien-Strak-Daten bereitgestellt werden. Diese erfahren bis zu *Quality Gate E* hin Überarbeitungen und Optimierungen, bis letztendlich die finale Freigabe erfolgen kann.

Zu *Quality Gate D* muss der Aufbau der Phase 1 E-Fzg. abgeschlossen sein, damit auf Basis von Erprobungsfahrten und Crashtests Erkenntnisse in die Serienkonstruktion einfließen können. So kann eine erste Bewertung des digitalen B-Fahrzeugs (Bestätigungsfahrzeug) erfolgen.

Mit dem Aufbau der Phase 2 E-Fzg. beginnt die Vorserienphase der Produktentwicklung. Zum *Quality Gate C* werden die E-Fzg. der zweiten Generation erstmals mit serienwerkzeugfallenden Teilen<sup>2</sup> bestückt. Dadurch kann beim Durchschreiten von *Quality Gate C* erstmals eine Optimierung der Produktionswerkzeuge und damit verbunden auch der Bauteile erfolgen.

Alle im Fahrzeuglastenheft gestellten Anforderungen sind zu *Quality Gate B* anhand vom B-Fzg. nochmals bestätigt (Crash, Dauerläufe, Abnahmefahrten). Zudem erfolgt eine weitere Optimierungsschleife der serienwerkzeugfallenden Teile. Abschluss des Entwicklungsprozesses bildet das *Quality Gate A*. Zum erfolgreichen Durchschreiten des letzten Gates müssen alle an der Entwicklung beteiligten Abteilungen ihre Freigabe erteilen (100% freigegebene Teile). Weiterhin erfolgen die Zertifizierung des Produkts und die Verkaufsfreigabe. Der Produktionstest findet in den ausgewählten Zielwerken statt. Abbildung

---

<sup>1</sup> Strak beschreibt den Verlauf der Linien eines Bootskörpers [www02] und bedeutet im automobilen Umfeld eine mathematisch exakte Flächenbeschreibung basierend auf Abtastpunkten

<sup>2</sup> Serienwerkzeugfallende Teile sind (Rohbau)-teile die mit den ersten Serienpresswerkzeugen produziert werden.

2.12 zeigt die Lage der *Quality Gates* des Lead Prozesses mit den einzelnen Kriterien in Relation zu den Phasen des Produktentwicklungsprozesses.

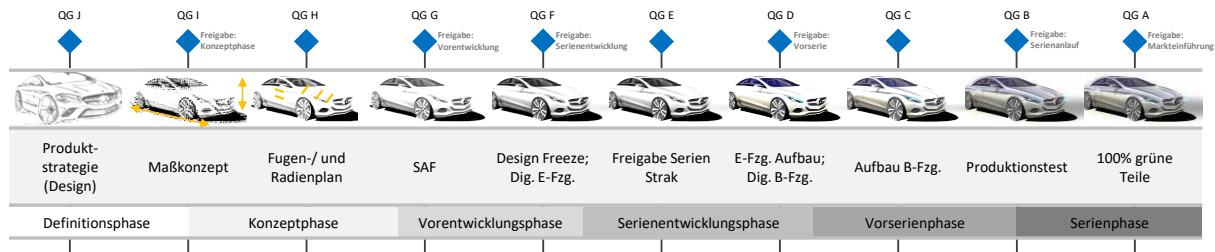


Abbildung 2.12 Lage der *Quality Gates* im *Lead*-Prozess in Anlehnung an [Räse]

Zwischen bzw. an den einzelnen *Quality Gates* liegen Meilensteine der einzelnen Fachabteilungen, die am Entwicklungsprozess beteiligt sind. Diese dienen als zusätzliche Synchronisationspunkte. Der Unterschied zwischen einem Meilenstein und einem *Quality Gate* liegt darin, dass ein Meilenstein an einem konkreten Termin erreicht werden muss, an dem Inhalte präsentiert werden müssen. Aufgrund einer immer strafferen und z.T. unrealistischen Zeitplanung bei der Entwicklung kommt es häufig dazu, dass Meilensteine nicht eingehalten werden können. Bei den *Quality Gates* hingegen wird ein Zeitrahmen vorgegeben. Die Inhalte, die es zu erreichen gilt, sind jedoch klar definiert [Coop]. Hierdurch ergeben sich entwicklungstechnische Freiräume, die produktiv genutzt werden. Konkrete Beispiele für Meilensteine aus der Fachabteilung Toleranzmanagement finden sich in Kapitel 2.3.5.

#### 2.1.4.2 Prozessmasterplan im Produktentwicklungsprozess der Daimler AG

Die Ziele, die es an den jeweiligen *Quality Gates* zu erreichen gilt, sowie die Termine fachspezifischer Meilensteine sind somit klar definiert bzw. festgesetzt. Zur besseren Übersicht der Gesamtfahrzeugentwicklung wird ein abteilungsübergreifendes Schaubild erstellt. Abbildung 2.13 zeigt eine vereinfachte Variante eines solchen Prozessmasterplans (PMP) der Daimler AG. Der Schwerpunkt des Schaubilds liegt dabei auf dem Entwicklungsprozess des Produkts.

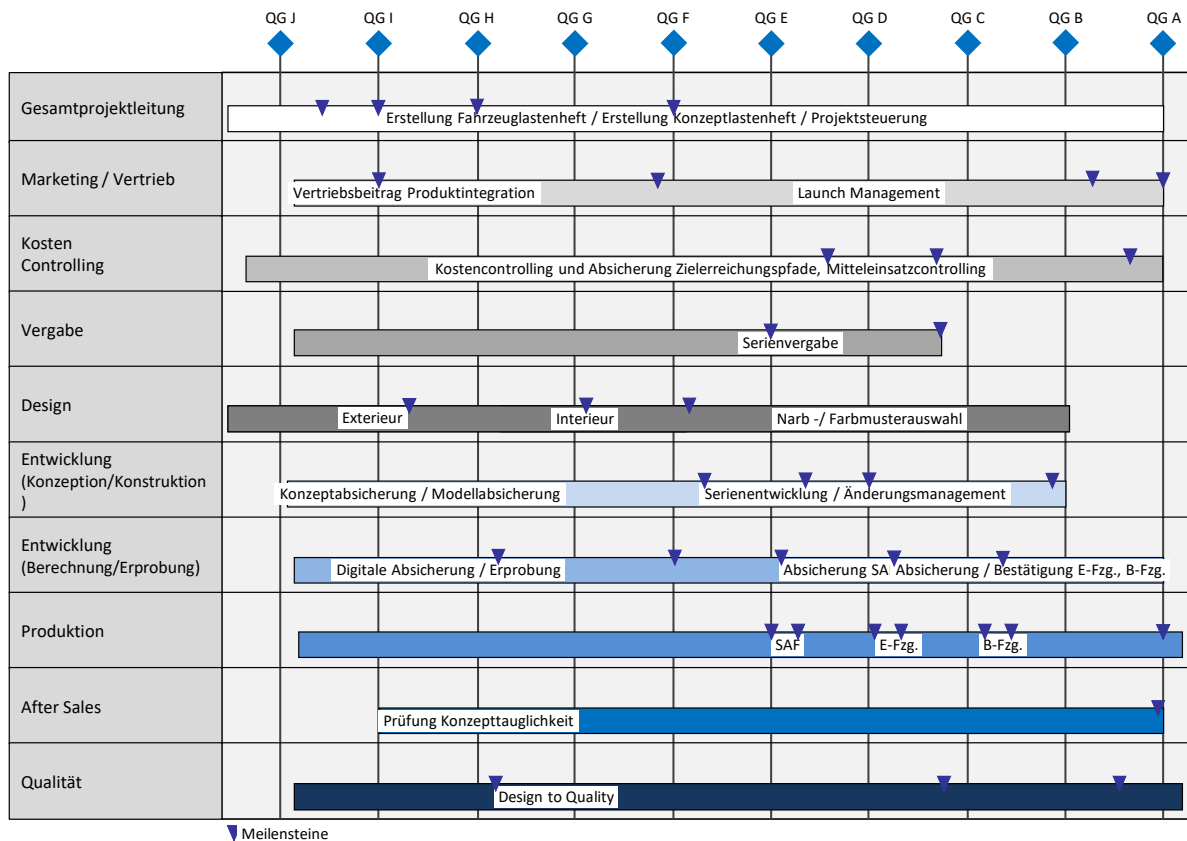


Abbildung 2.13 Prozessmasterplan mit Schwerpunkt auf der Produktentwicklung (Auszug)

Auffällig ist, dass nicht alle Fachabteilungen ständig während der gesamten Produktentstehung in den Prozess eingebunden sind. So ist die Designabteilung vorwiegend in der frühen Phase der Produktentwicklung involviert. Der Bereich passive Sicherheit (Crash) kann dagegen erst dann tätig werden, wenn die erste Hardware in Form von Prototypen zur Verfügung steht. Durch die zeitlich versetzte Entwicklung von weiteren Fahrzeugtypen (Derivaten etc.) kann so eine optimale Arbeitsauslastung der Abteilungen gewährleistet werden. Abteilungen, die über den gesamten Produktentwicklungsprozess beteiligt sind (z. B. Konstruktion), sind personell entsprechend zu besetzen.

### 2.1.5 Systeme (IT-Tools) im Produktentwicklungsprozess

Neben der systematischen und nachvollziehbaren Vorgehensweise bei der Entwicklung eines neuen Produkts ist auch die Wahl der richtigen Organisationsform innerhalb des produzierenden Unternehmens wichtig. Zudem muss die richtige Art und Weise der Speicherung der während des Entwicklungsprozesses anfallenden Informationen und Daten gewährleistet sein. Dazu stehen Produktdatenmanagementsysteme zur Verfügung. Nach [Eign, Stel] wird das Produktdatenmanagement (PDM) als „das Management des Produkt- und



Prozessmodells mit der Zielsetzung, eindeutige und reproduzierbare Produktkonfigurationen zu erzeugen“ definiert. Dabei liefert das PDM Konzepte für eine vollständige Verwaltung der Produktdaten nebst der Integration von Prozessen, Organisationen sowie der verschiedenen Software-Anwendungen über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg [Eign, Stel] [www03].

Mithilfe von entsprechenden Produktkonfigurationen innerhalb dieser Systeme ist es dem Anwender so möglich, in jedem Entwicklungsstadium des Produktes Auskunft über dessen Bauzustand zu erhalten. Die aktuelle Darstellung der vorhandenen Daten und Informationen samt deren Entstehungsprozess ist somit im Bedarfsfall standortübergreifend gewährleistet. Durch das Rechtekmanagement können sensible Daten entsprechend geschützt werden. Die wesentlichen Vorteile eines solchen PDM-Systems sind:

- Steigerung der Produktivität durch Wieder- bzw. Weiterverwendung von bestehenden Daten
- Zeitersparnis durch einen eindeutigen, schnellen Informationszugriff
- Steigerung der Zusammenarbeit sowohl innerhalb des Unternehmens als auch mit externen Zulieferern und Entwicklungsdienstleistern

Abbildung 2.14 zeigt das Prinzip eines solchen PDM-Systems in der Entwicklungsphase eines Produkts. Das PDM-System dient dabei als Integrationsplattform für völlig unterschiedliche Anwendungen in der Produktentwicklung (CAD, FEM, CAT, CAQ etc.) durch entsprechende Schnittstellen, für unterschiedlichste Prozesse (Konzepterstellung, Freigabemanagement, Änderungsmanagement), für Dokumente (Zeichnungen, Anträge etc.), Daten (3D-CAD, Stücklisten, Stammdaten etc.) und Tätigkeiten und Zugriffsrollen [Katz1].

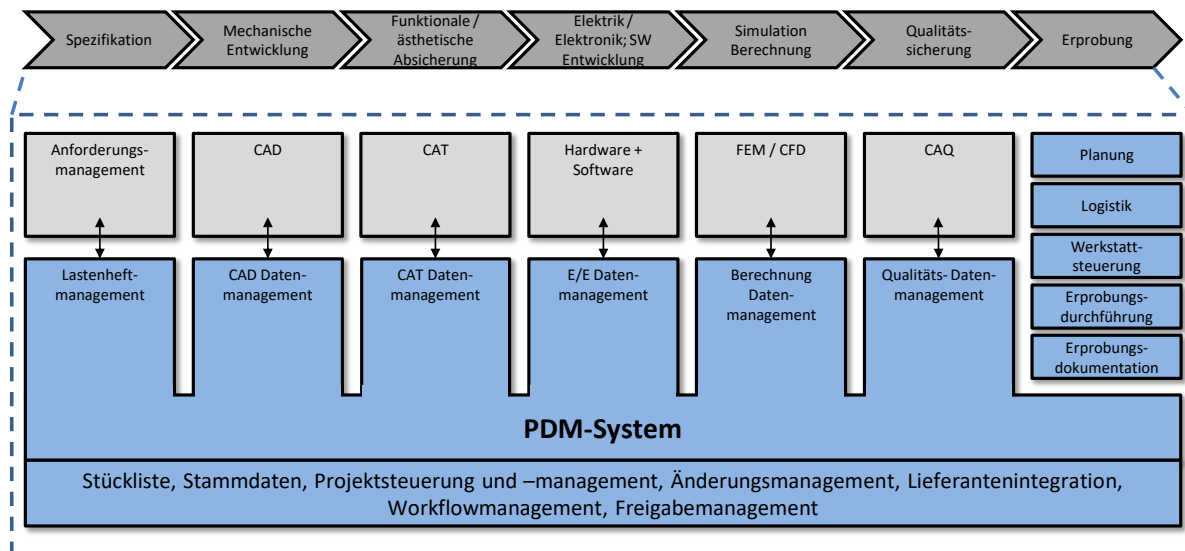


Abbildung 2.14 PDM-System als Integrationsplattform unterschiedlicher Anwendungen, Prozesse und Organisationen in Anlehnung an [Katz1]

## 2.1.6 Prozessmodellierung für effiziente Produktentwicklung

Stetiger Wandel im Unternehmen hinsichtlich der Organisation (z. B. Umstrukturierungen) und das fortwährende Bestreben einer Reduzierung der Entwicklungszeit fordern eine ständige Optimierung der im Produktentwicklungsprozess verwendeten Systeme. Neue Organisationsformen verändern Zahl und Art der Schnittstellen zwischen Systemen und ermöglichen z.T. die Einarbeitung von zusätzlichen Informationen. Unternehmenseigene IT-Abteilungen gewährleisten unter Einsatz von Methoden und entsprechenden Vorgehensmodellen eine fortwährende Prozessmodellierung. Die gängigen Vorgehensmodelle werden nachfolgend kurz erwähnt.

### 2.1.6.1 Prozessmodellierung nach MDA (Model Driven Architecture)

Das Konzept der Model Driven Architecture (MDA) basiert auf einem entsprechenden Softwareentwicklungsansatz. Basis dieses Ansatzes bildet das durch die Object Management Group (OMG) standardisierte UML<sup>3</sup> [OMG]. Grundprinzip ist die Trennung von Funktionalität und Technik [Brow]. MDA basiert auf der Erkenntnis, dass Modelle „wichtige Artefakte im

<sup>3</sup> Das UML-Klassendiagramm beschreibt dabei neben dem Objekt auch die Informationsstrukturen, welche sowohl intern als auch bei der Kommunikation mit den Benutzern Anwendung finden. Die Beschreibung der Informationen basiert dabei implementierungsunabhängig. Die Klassen und Beziehungen können dann auf die unterschiedlichen Arten implementiert werden, z. B. durch Datenbanktabellen, XML-Knoten oder Kombinationen aus Softwareobjekten. [www11]

Softwareentwicklungsprozess“ bilden, wobei diese „immer kontextbezogene Abstraktionen“ darstellen [www04]. Der Softwareentwicklungsprozess wird dabei in die Sichten Geschäftssicht und IT-Sicht unterteilt. Das Ziel ist die automatisierte Ableitung der plattformspezifischen Modelle aus den plattformunabhängigen. Dadurch reduziert sich der Aufwand der Softwareentwicklung. Parallel dazu wird die Adaption an veränderte Gegebenheiten und neue Technologien vereinfacht. Die Prozessmodellierung nach MDA gliedert sich dabei nach [www04] in folgende vier Schritte :

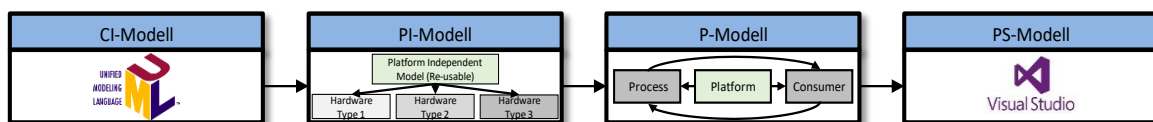


Abbildung 2.15 MDA Prozessentwicklung [www04]

### 2.1.6.2 Service orientated modeling and architecture (SOMA)

Neben der grundlegenden Prozessmodellierungsmethode haben sich zahlreiche weitere Methoden etabliert (zumeist unterstützt durch Softwarelösungen führender IT-Unternehmen).

Service oriented modeling and architecture (SOMA) stellt eine Methode dar, die es ermöglicht, anforderungsorientierte Architektur in Form einer Applikation bereitzustellen. Dabei stellt SOMA durchgängige Analysemöglichkeiten sowie Vorgehensweisen bereit, welche die bisherigen objektorientierten und komponentenbasierten Methoden erweitert. Dazu gliedert sich SOMA in die drei Phasen: Identifikation, Spezifikation und Umsetzung [Arsa]. Siehe dazu auch Abbildung 2.16.

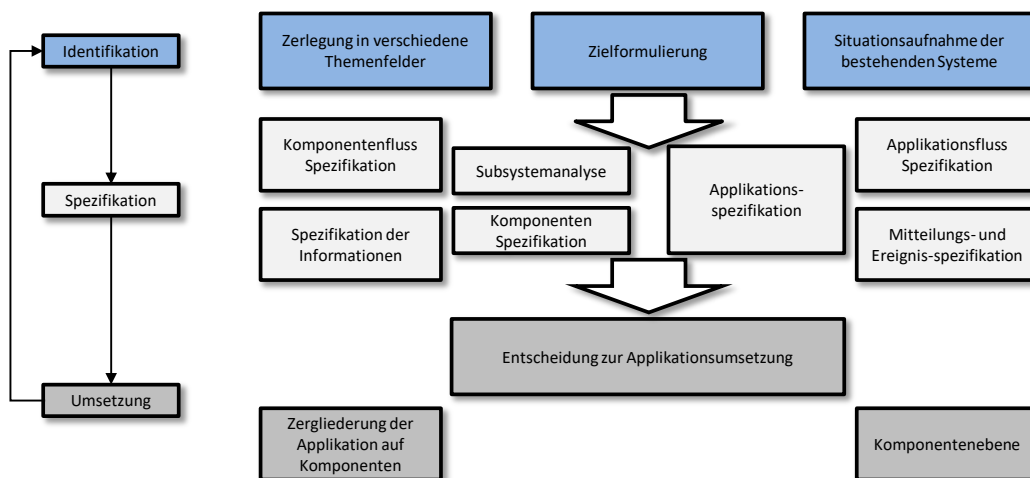


Abbildung 2.16 Service orientated architecture and application (SOA) nach [Arsa]

Diese drei Phasen werden genutzt, um die drei wesentlichen Elemente von SOA zu bedienen:

- Formulierung der Aufgaben
- Bereitstellung lösungsrelevanter Komponenten und Module
- Nutzen von Abläufen, um Aufgaben innerhalb der SOA zusammenzustellen

Durch eine ständige Validierung während der Umsetzungsphase von SOMA wird die vollständige Integration des erarbeiteten Systems in die unternehmenseigenen Abläufe sichergestellt. Dabei wird auch die flexible Anpassung an sich schnell an veränderte Gegebenheiten berücksichtigt.

### **2.1.6.3 Beispiel für Prozessmodellierung im Automobilbau**

Auch große OEMs (Original Equipment Manufacturers) wie die Daimler AG nutzen auf MDA und SOMA basierende Entwicklungsmethoden. Die Daimler AG unterscheidet zwischen den drei Ebenen Fachmodell, Systemmodell und ausführbares Modell [Buch, Baue, Reic].

Im Fachmodell erfolgt die Dokumentation von Anforderungen an die zu realisierende Applikation. Zur graphischen Darstellung werden zumeist einfache UML-Diagramme verwendet. Diese ermöglichen die Modellierung des Prozessablaufs (Kontrollfluss) mit dessen Aktivitäten, Ein- Ausgangsdaten und verantwortlichen Personen. Häufig erfolgen bei der Erstellung direkte Befragungen des Endanwenders und/oder des Prozessverantwortlichen. Die graphische Darstellung der fachlichen Prozesse erleichtert die schnelle Auffindung etwaiger Fehler durch den jeweiligen Fachbereich. Oberste Prämisse bei der Darstellung des fachlichen Modells ist die Gewährleistung der klaren und einfachen Verständlichkeit für alle Beteiligten. Die Erstellung dieses Modells liegt in der Verantwortung des jeweiligen Fachbereichs.

Das Systemmodell wird durch schrittweises Detaillieren und Formalisieren aus dem Fachmodell gewonnen. Die Verantwortung übernehmen der IT-Bereich und der Fachbereich (oftmals realisiert durch sog. Schnittstellenfunktionen). Änderungen der Zusammenhänge können nur in Abstimmung mit dem Fachbereich durchgeführt werden. Auch dieses Modell muss noch so strukturiert sein, dass es vom Endanwender verstanden werden kann (z. B. graphische Notationen, Struktur). Das Systemmodell bildet die Basis einer plattformunabhängigen IT-Spezifikation.

Die Weiterentwicklung zum ausführbaren Modell obliegt dagegen allein der Verantwortung des IT-Bereichs. Durch die formalisierte, detaillierte Beschreibung des Modells sind keine weiteren fachlichen Entscheidungen mehr notwendig. Es müssen lediglich die zielplattformabhängigen Randbedingungen wie Datenobjekte, implementierte Services, Schnittstellen, Organisationsmodelle etc. berücksichtigt werden. Dies erfordert ausschließlich Knowhow des IT-Spezialisten. Abbildung 2.17 zeigt die Prozessmodellierung der Daimler AG in Anlehnung an [Schm].

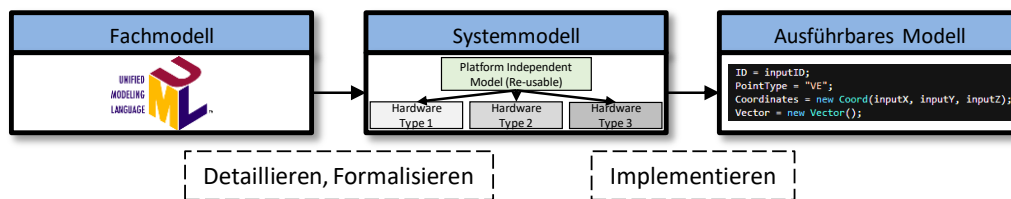


Abbildung 2.17 Prozessmodellierung bei der Daimler AG in Anlehnung an [Schm]

### 2.1.7 Informationen und Daten im Produktentwicklungsprozess

Auch heute noch sind technische Zeichnungen in vielen Industriezweigen der Hauptinformationsträger zur erweiterten Beschreibung des Produktes. Mit der Durchsetzung der 3D-CAD-Anwendungen in den 90er Jahren erfolgte jedoch ein schrittweises Verdrängen der einfachen technischen Zeichnungen. Im heutigen Konstruktionsalltag werden Bauteilgeometrien als 3D-Datensatz entwickelt, wodurch eine stets eindeutige Darstellung erreicht wird. Der Bruch in der Informationskette wird heute zumeist durch die Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktion verursacht, da hier noch Zeichnungen zum Einsatz kommen; d.h. es kommt zur Übertragung der Informationen aus dem 3D-Datensatz in eine 2D-Zeichnung, was für den Konstrukteur einen aufwendigen Schritt darstellt, der nicht die Kernaufgabe der Entwicklungsleistung bildet. Hauptaufgabe ist es, einen in sich konsistenten 3D-Datensatz zu generieren. Der durchgängige 3D-Prozess bildet damit die Grundlage für eine konzernweite Effizienzsteigerung. [Paff].

Neben mitunter nicht eindeutigen Darstellungen oder Schwierigkeiten bei der Interpretation der Zeichnung hat diese noch weitere Nachteile.

So existiert zur Erstellung von klassischen zweidimensionalen Zeichnungen eine unübersichtliche Vielzahl von Normen nach ASME, ISO oder JIS. Das macht eine fehlerlose Interpretation im Sinne einer globalisierten Produktentwicklung (Cross-Enterprise-Engineering) schwierig. Weiterhin ist es oft sehr schwer, Bauteile aus dem 3D-

Modellierungszustand korrekt in 2D-Zeichnungen zu überführen. Dies verursacht einen vermeidbaren Informationsverlust. Exemplarisch sind hier komplexe Blechbauteile aus dem automobilen Umfeld genannt [Dass]. Auch der Fortschritt der Softwareentwicklung in den letzten Jahren hat zu keinem Format geführt, das die Zeichnung im Sinne einer 1:1 Beziehung an den 3D-Datensatz koppelt. Dadurch kommt es bei geometrischen Änderungen am 3D-Modell zu großem Nacharbeitsaufwand am Zeichnungsmodell, da nicht alle Zusatzinformationen wie Maße, Toleranzen, Fertigungshinweise automatisch aktualisiert werden. Diese nachträglichen Anpassungen an der Zeichnung sind aufwändig und kostenintensiv; oftmals ist eine Bearbeitung pro Ansicht erforderlich.

Die 2D-Zeichnung bietet heute für die Konstruktion keinerlei Vorteile. Sie dient vielmehr nur noch dazu, Folgeprozesse wie Fertigung, Montage und Dokumentation mit Informationen zu versorgen. Dadurch erscheint es aus Konstruktionssicht zwingend, sich auf eine einzige Art der Informationsquelle zu beschränken. Die 3D-Mastermethode bildet die Basis für dieses Vorhaben. [Kits, Hasl], [Paff]

#### **2.1.7.1 Grundlagen der 3D-Mastermethode**

Die 3D-Master Methode beschreibt einen integrierten, durchgängigen 3D-Prozess. Dabei wird auf den Einsatz von 2D-Zeichnungen verzichtet. Die nach DIN 6789-2 [DIN6789-2] relevanten Informationen, die zeichnungs- und stücklistenrelevant sind, werden direkt in das 3D-Modell eingebunden. Damit entfällt die manuelle Eintragung in die technische Zeichnung. Der effektive Einsatz der 3D-Mastermethode erfordert die Anpassung der Folgeprozesse an die die veränderten Gegebenheiten.

Durch den Einsatz von 3D-Master wird die aufwändige Zweiteilung des Konstruktionsprozesses in 3D und 2D obsolet. Die unnötige Redundanz der Arbeitsschritte und der Dokumente wird durch den Einsatz dieser Methode verhindert. Damit lässt sich eine deutliche Effizienzsteigerung im Entwicklungsprozess erreichen. Der durch die redundante Datenhaltung erwähnte zusätzliche Synchronisierungsaufwand, entfällt. Dadurch kommt es vor allem bei großen Baugruppen auch zu einer erheblichen Minimierung des Fehlerpotentials.

Das Anbringen von Zeichnungsinhalten im laufenden Konstruktionsprozess ermöglicht die Erstellung von featurebasierten und somit assoziativen Informationen. Diese featurebasierenden Informationen erlauben im Folgeprozess das maschinelle Auslesen und

dienen beispielsweise als konsistente Datenbasis weiterer, im Entwicklungsprozess notwendiger Schritte. So erfolgt im Rahmen der CAM-Programmierung die featurebasierte Weiterverarbeitung von 3D-Master Informationen. Dabei werden die Informationen aus dem 3D-Masterdatensatz an das Bearbeitungszentrum übermittelt, welches basierend auf den vorhandenen Featureinformationen automatisch einen standardisierten Fertigungsprozess generiert. So lassen sich z. B. Gewindeinformationen aus dem 3D-Mastermodell für die Werkzeug- und Fertigungsverfahrensauswahl übernehmen.

Diese Vorgehensweise ist bei 2D-Zeichnungen nicht anwendbar. Pixelgraphiken wie tif oder jpeg erlauben keine maschinell lesbare Informationsgenerierung. Einziger Zweck ist hier eine Interpretation durch den Menschen. Objekt- beziehungsweise vektorbasierte Graphiken bieten zwar mehr Informationen, die auch maschinell ausgelesen werden können, eignen sich jedoch nur für die Fertigung sehr einfacher Bauteile [Dass2]. Abbildung 2.18 strukturiert die verschiedenen Informationen einer technischen Zeichnung.

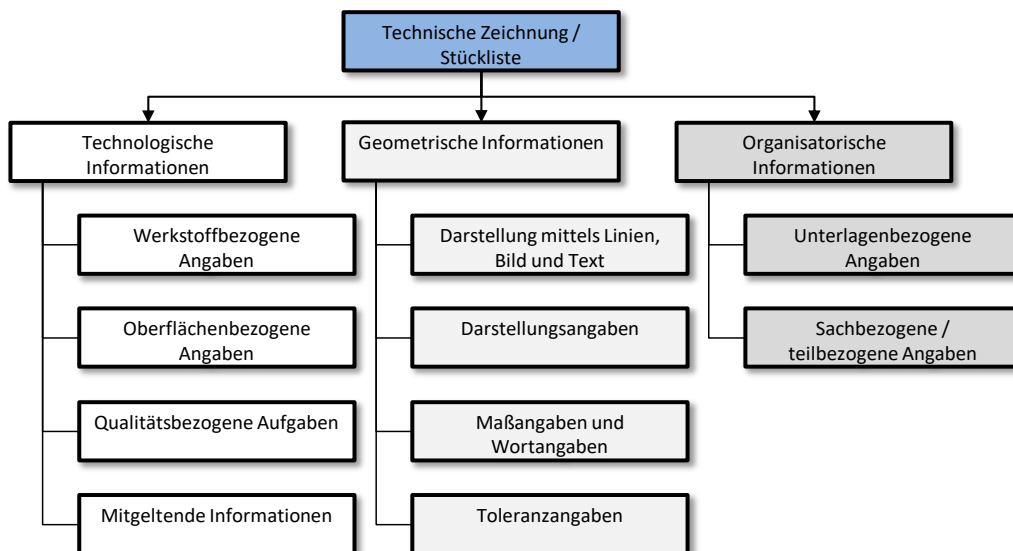


Abbildung 2.18 Informationen der technischen Zeichnung / Stückliste nach DIN 6789-2 (eigene Darstellung)

Auch für Folgeprozesse bietet die Verwendung der 3D-Mastermethode Vorteile. So muss bei Bauteiländerungen nicht auf eine aktualisierte Zeichnung gewartet werden, was den Produktentstehungsprozess unnötig verlängert. Es kann direkt der 3D-Datensatz an den Folgeprozess übermittelt werden. Durch den Einsatz von günstigen und nutzerfreundlichen Visualisierungs-Tools lassen sich diese Informationen auch ohne weitreichende CAD-Kenntnisse systemunabhängig visualisieren. Viele Tools bieten zudem die Möglichkeit, Schnitte im 3D-Modell zu erzeugen, um Geometrie zu messen. Somit stehen auch den Zulieferern alle notwendigen Informationen zur Verfügung [Paff].

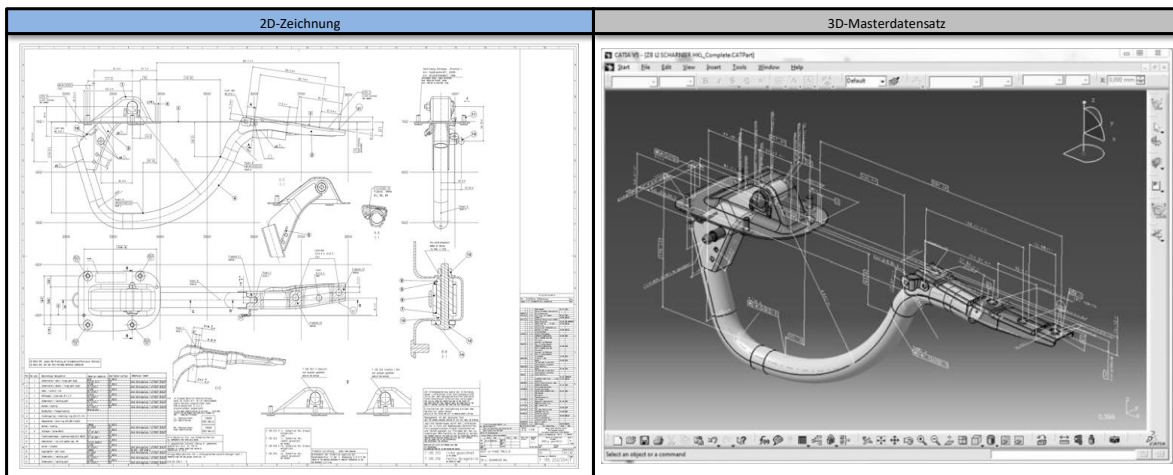


Abbildung 2.19 Vergleich der 2D Dokumentation (links) und der 3D Dokumentation nach 3D Mastermethode (rechts) der Baugruppe Scharnier [Kits, Hasl]

### 2.1.7.2 Ausgewählte Anwendungsgebiete von 3D-Master in der Industrie

Nachfolgend werden repräsentative Beispiele für den Einsatz der 3D-Master-Methode in der Industrieproduktion gegeben.

#### Anwendung in der Produktentwicklung

Während der Produktentwicklung erfolgt das Durchschreiten zahlreicher Qualitygates (siehe Kapitel 2.1.4). Dabei existieren neben den Qualitygates zur Bewertung des Projektstatus auch sogenannte Daten-Qualitygates, bei denen der digitale Reifegrad des Produktes bewertet wird. Es werden neben dem Detaillierungsgrad der Ausarbeitung und der Kollisionsfreiheit auch die Güte der Flächenmodellierung sowie der Status der Einarbeitung von Änderungen beurteilt. Zahlreiche im Lastenheft des Produktes befindliche Informationen finden sich so prozessual im 3D-Modell wieder. Dabei erfolgt eine Aufteilung in Geometrieinformationen, Fertigungsinformationen und weitere konstruktionsbedingte Metadaten. Dabei wird durch die Konstruktionsabteilung neben den reinen CAD-Geometrien auch eine Produktstruktur sowie alle nötigen Varianten an Bauteilen und Baugruppen definiert, um die verschiedenen Variationen des Produktes abbilden zu können. Im Sinne des mechatronischen Produktentwicklungsprozesses nach der VDI-Richtlinie 2206 geschieht dies sowohl auf mechanischer, elektrischer, elektronischer als auch auf softwaretechnischer Ebene. Beim Durchschreiten eines Qualitygates erfolgt dann eine Prüfung dieser Daten anhand festgelegter Kriterien. Dies wird zumeist mithilfe des im PDM-System verankerten Freigabemanagements realisiert (vgl. Kapitel 2.1.5), sodass kein Bruch in der Informationskette vorliegt [Paff].



Hauptanwender des 3D-Masterprozesses in der Produktentwicklung sind derzeit Automobil- und Luft- und Raumfahrtunternehmen. Aufgrund der Komplexität der hierbei erzeugten Produkte ermöglicht der Einsatz einer singulären Informationsquelle einen besonders großen Benefit im Vergleich zum Einsatz von 2D-Zeichnungen im Produktentwicklungsprozess. Abbildung 2.20 zeigt derzeitige Einsatzgebiete der 3D-Mastermethode der oben genannten Branchen.

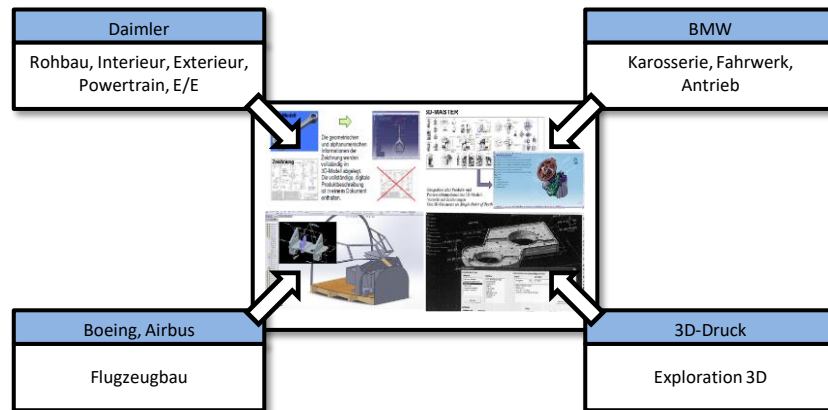


Abbildung 2.20 Übersicht der Einsatzgebiete der 3D-Mastermethode in den Branchen Automobilindustrie sowie Luft- und Raumfahrttechnik [Litw2]

### Anwendung in der technischen Produktdokumentation

Auch im Sinne der Langzeitarchivierung von Produktdaten ist die Anwendung der 3D-Mastermethode sinnvoll und bietet viele Vorteile. Die Langzeitarchivierung ist einerseits nötig, um später Produkthaftungsfragen klären zu können. Andererseits gewährleistet sie eine Art Wissenserhalt innerhalb des Unternehmens. Auch die Fahrzeugzertifizierung wird mehr und mehr mithilfe von 3D-Masterdaten durchgeführt. Knackpunkt bei der Langzeitarchivierung von 3D-CAD-Daten bildet die ihre systemunabhängige Speicherung, die zumeist eine Basisfunktion des PDM-Systems bildet [Paff]. Im automobilen Umfeld haben sich dazu inzwischen neutrale Austauschformate wie JT (Jupiter Tessellation Standard) oder auch STEP (Standard for the Exchange of Product model data) durchgesetzt.

Als Vorreiter wird hier auf „Dassault Aviation“ verwiesen, einen Hersteller von Business-Jets. Diese Firma hat im Jahr 2010 als erster Flugzeughersteller der Welt die Freigabe der Musterbauart und der Endfertigung der Flugzeugmodellreihen Falcon 7X, Falcon 900 und Falcon 2000 ausschließlich auf Basis von 3D-Masterdaten erreicht. Sowohl die Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten (Federal Aviation Administration), als auch die Europäische Agentur für Flugsicherheit (European Aviation Safety Agency) waren in der

Lage die Flugsicherheit der Modellreihe anhand der 3D-Masterdaten zu bestätigen [www05]. Laut eigenen Angaben der Firma wurde durch den konsequenten Einsatz von 3D-Masterdaten die Produktivität um 40% erhöht. [Dass2].

### Einsatz der 3D-Mastermethode bei der Daimler AG

In [Bril] wird die Konstruktionsmethodik als Basis für den Einsatz der 3D-Mastermethode nach Daimler AG Standard beschrieben. Als verwendetes System kommt hierbei Catia V5 zum Einsatz. Mit dem Wechsel auf Siemens NX im Jahre 2010 erfolgte eine schrittweise Transformation der erarbeiteten Vorgehensweisen. Es wird dabei sichtbar, dass die 3D-Mastermethode die CAD-systemunabhängig Anwendung erlaubt. Einzig ein eindeutiger Standard in Kombination mit einem parametrischen CAD-System muss beim Einsatz der 3D-Mastermethode [Bril] berücksichtigt werden.

Kernelement der 3D-Mastermethode bei der Daimler AG ist die so genannte Templatemethode. Sie findet Anwendung bei einem Großteil der entwickelten Baureihen der Daimler AG. Grundlage dieser Konstruktionsmethode bildet ein Musterfahrzeugrohbau auf Basis von Vorgaben als vollständig assoziatives 3D-CAD-Modell mit definierten Schnittstellen. Durch den Einsatz dieser Templatemethode kann ein vereinfachter Rohbau, der durch Veränderung der Vorgaben generiert wird, einfach auf veränderte Randbedingungen hin angepasst werden. In der Konzeptphase ist es also möglich, Änderungen schnell einzuarbeiten und automatisierte Konstruktionsumfänge zu aktualisieren. Ziel ist es, zu Beginn der Entwicklung ein umfangreiches CAD-Datenmodell zu erzeugen. Bei der späteren Ausarbeitung der Bauteile kann dadurch auf eine detaillierte Datenbasis zurückgegriffen werden [Katz2]. Abbildung 2.21 zeigt den Einsatz von Templates im Produktentwicklungsprozess in Anlehnung an [Katz2].

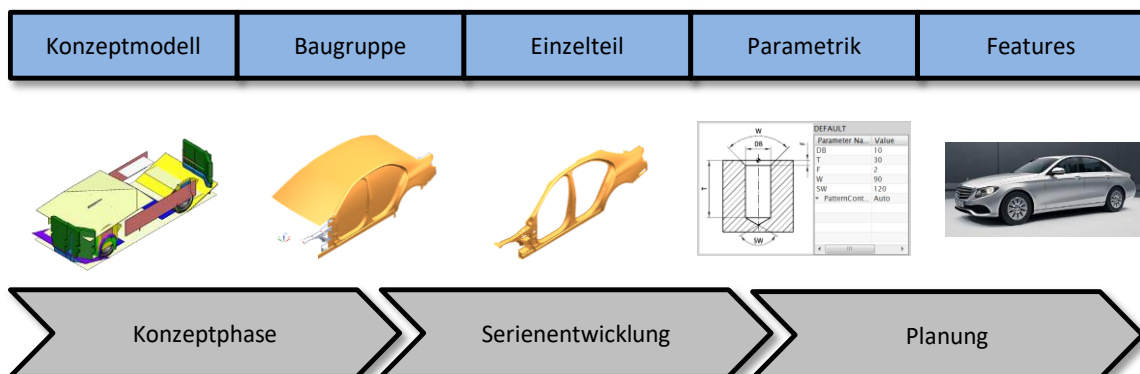


Abbildung 2.21 Templateeinsatz im Produktentwicklungsprozess [Katz2]

Durch eine Reduktion dieser Daten kann das Template-Knowhow geschützt, sowie die Performance beim Umgang mit sehr großen Baugruppen verbessert werden. Auch im Interieur, im Powertrain und in der Auslegung von Kabelbäumen erfolgt der Einsatz der 3D-Mastermethode bei der Daimler AG [Litw2] [Neck, Wint, Viel].

### **Einsatz der 3D-Mastermethode bei der BMW AG**

Auch die BMW AG setzt seit ca. 2009 auf die zeichnungslose Produktbeschreibung in der Karosserieprozesskette. Durch die stetige Weiterentwicklung von 3D-CAD-Systemen wie CATIA V5 erfolgte ein Wandel bei der Erzeugung von Konstruktionsumfängen. Bei BMW wurde, wie bei vielen anderen Automobilherstellern bis 2009, auf zweidimensionale Zeichnungen gesetzt, die parallel zum 3D-Datensatz erstellt und gepflegt wurden. Nach der Einführung der zeichnungslosen Produktbeschreibung in der Karosserieentwicklung bestand die Herausforderung, diesen Prozess auf die gesamte Fahrzeugentwicklung zu übertragen. Jedoch ist auch nach der Einführung der 3D-Mastermethode bei der BMW AG die technische Zeichnung nicht gänzlich weggefallen. So kommen diese Zeichnungen bei Anfragen potenzieller Lieferanten zum Einsatz. Auch bei Elektrik- und Elektronik-Komponenten finden diese bei Logikbeschreibungen Verwendung. Für gesetzliche und länderspezifische Zulassungen sind nach wie vor vom Gesetzgeber Zeichnungen zwingend vorgeschrieben (z. B. reine Abmaße eines Fahrzeugs). Auch bei der Auditierung kommen zur Dokumentation Zeichnungen zum Einsatz.

Generell unterscheidet man bei der BMW AG den Einsatz der 3D-Mastermethode in drei unterschiedlichen Modelle: Die Ablage im 3D-Modell, in der hauptsächlich Geometriebeschreibungen, Bauteiltoleranzen, Lochkennzeichnungen, Ausrichtungen von Einzelteilen etc. hinterlegt werden. In Zusatzdokumenten erfolgt die Ablage von Informationen wie Schaltbildern, Etikettangaben, Positionszeichnungen etc. Das Metadatenmodell wird bei der BMW AG im PDM-System hinterlegt (z. B. Änderungshistorie, Freigabeinformationen, Werkstoffe, Stückliste etc.). Dadurch verspricht sich das Unternehmen die Vermeidung redundanter Datenhaltung und eine zentrale Informationsbereitstellung, die die einfachere Zusammenarbeit mit Zulieferern und externen Dienstleistern ermöglicht [Kits, Has]. Zudem können Folgeprozesse optimiert werden.

## 2.2 Produktionsentwicklung im Automobilbau

Die Entwicklung, Produktion und Vermarktung neuer innovativer Produkte in einem sich ständig wandelnden Umfeld mit zahlreichen Wettbewerbern erfordert einen immer strafferen Produktentstehungsprozess (PEP). Dabei gliedert sich nach [Eign, Stel] der Produktentstehungsprozess in den Produktentwicklungsprozess (siehe Kapitel 2.1), den Produktionsentwicklungsprozess und aus IT-Sicht in die virtuelle Produktentwicklung. Sie umfasst die digitale Planung, die Fertigungs- und Montagesimulationen, das Management der Produkt- und Produktionsplanungsinformation sowie deren Visualisierung. Bedingt durch die Notwendigkeit von Baumustern und Prototypen kann im praktischen Entwicklungsprozess keine strikte Trennung zwischen Produktentwicklung sowie Produktionsentwicklung und Produktherstellung erfolgen. Abbildung 2.22 zeigt den Entwicklungsprozess mit den sich überlagernden Prozessen (Produktentwicklung, Produktionsentwicklung und Produktherstellung) [Eign, Stel].

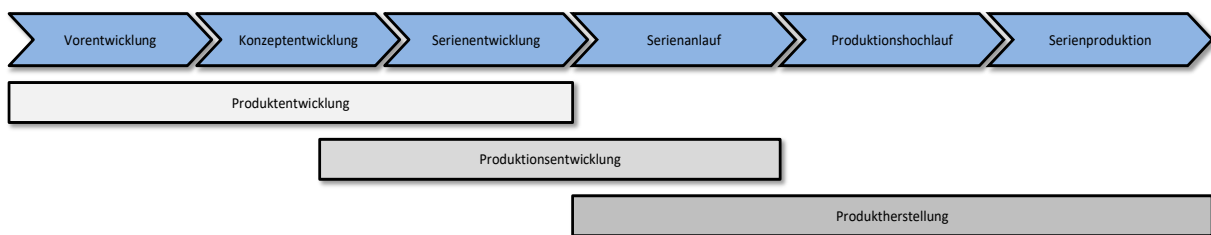


Abbildung 2.22 Untergliederter Entwicklungsprozess Produkt/ Produktion [Eign, Stel]

Nachfolgend werden die Begriffe Produktion, Produktionsentwicklung und Produktherstellung definiert.

### 2.2.1 Begriffsverständnis Produktion, Produktionsentwicklung und Produktherstellung

Nach [Schub] wird unter dem Begriff der Produktion eine Vielzahl an Vorgängen verstanden, die durch geschickte Kombinationen der Produktionsfaktoren wie Arbeit, Kapital und Rohstoffe zu Gütern und Dienstleistungen überführt werden. Dabei kann das Produkt entweder direkt auf dem Markt abgesetzt (Marktproduktion), vom Hersteller selbst weiterverwendet (Eigenverwendung) oder anderweitig vom Hersteller weiter genutzt werden (sonstige Nichtmarkproduktion).

Unter dem Begriff der Produktionsentwicklung wird die Ausarbeitung der Herstellprozesse verstanden, die eine Serienproduktion ermöglichen. Dabei die Schwerpunkte auf der Konstruktionsphase und der Serienanlaufphase. In diesen Phasen erfolgt die Entwicklung der gesamten Produktionsanlage, sodass diese anschließend vor dem SOP (Start of Production) bereits eine Kleinserie des Produktes produzieren kann (z. B. Bestätigungsfahrzeuge). Erarbeitete Produktionsverfahren lassen sich in dieser Phase noch verbessern und auf die verwendeten Produktionsmittel hin ausrichten. Mit dem SOP endet sowohl die Entwicklung des Produktes als auch die der Produktion [Wedde].

Unter dem Begriff der Produktherstellung wird die Herstellung von ersten Produkten unter seriennahen Bedingungen verstanden. Zum SOP hin erfolgt bereits während des Hochlaufens der Produktionsanlage die Fertigung der ersten kundentauglichen Produkte. Ein Übergang in die endgültige Serienproduktion ist erreicht, sobald zuvor definierte Kriterien wie Produktionsvolumen, Qualitätsmerkmale oder Taktzeiten ohne Störungen erreicht werden [Wedde] [Ehre, Meer].

## **2.2.2 Methoden der Produktionsentwicklung**

Auch bei der Entwicklung der Produktion kommen Methoden und Vorgehensmodelle ähnlich der der Produktentwicklung zum Einsatz. Kennzeichnend für die Produktionsentwicklung ist einerseits eine produktionsgerechte Produktauslegung, andererseits ein Produktionssystem mit entsprechendem Produktionsprozess, welcher letztendlich das ideale Produkt liefert.

Im Bereich der Produktentwicklung kommen Methoden und Werkzeuge zum Einsatz, um das Produkt digital zu entwerfen und zu optimieren. Auch bei der Produktionsentwicklung besteht das Bestreben, vermehrt digitale Methoden und Werkzeuge zur Planung und Absicherung einzusetzen. Zusammenfassend werden diese unter dem Begriff „Digitale Fabrik“ geführt [Eign, Stel]. Nach [Spat, Leut] bilden solche Werkzeuge einen wesentlichen Bestandteil des Produktionslebenszyklus. Eine Definition des Begriffs „Digitale Fabrik“ sowie ihrer Ziele wird nachfolgend erläutert.

### **2.2.2.1 Digitale Fabrik**

Die Anforderungen an die Digitale Fabrik sind vielfältig. So muss sie beispielsweise eine integrierte Datenbereitstellung für alle beteiligten Planungsprozesse bieten. Weiterhin müssen die Informationen der Produktplanung zur Weiterverarbeitung bedarfsgerecht

aufbereitet werden. Die optimale Unterstützung der Planungsprozesse stellt eine weitere Anforderung an die Digitale Fabrik dar. Dies alles muss vor dem Hintergrund ständig anwachsender Varianten an Produkten (z. B. viele Derivate und länderspezifische Laststufen), einer sehr heterogenen Prozesslandschaft sowie global verteilten Produktionsstandorten gesehen werden.

Nach VDI 4499 [VDI4499] und [Kühn] ist damit die Digitale Fabrik definiert als „Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen - u. a. Simulation und 3D-Visualisierung - die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“

Die Wirkungsfelder der Digitalen Fabrik gliedern sich in fünf wesentliche Bereiche [Vajn, Webe]:

- Optimierung der Planungsprozesse durch digitale Methoden und Werkzeuge
- Frühzeitige Absicherung der Planungsumfänge bezüglich der Herstellbarkeit und der Ergonomie
- Gewerksübergreifende Integration und enge Verzahnung von Entwicklung und Produktion
- Entwicklung von Standards und Bibliotheken
- Sicherstellung der Datendurchgängigkeit und Datenversorgung.

Durch den sehr hohen Grad der virtuellen Absicherung gerade bei Neukonzepten soll damit die Serienanlaufphase unter Einhaltung aller Randbedingungen drastisch verkürzt werden. Eine enge Vernetzung zwischen Produkt- und Produktionsentwicklung ist dabei unabdingbar. Abbildung 2.23 zeigt die beiden Entwicklungsprozesse sowie ihre notwendige exemplarische Vernetzungen in Anlehnung an [Eign, Stelz].

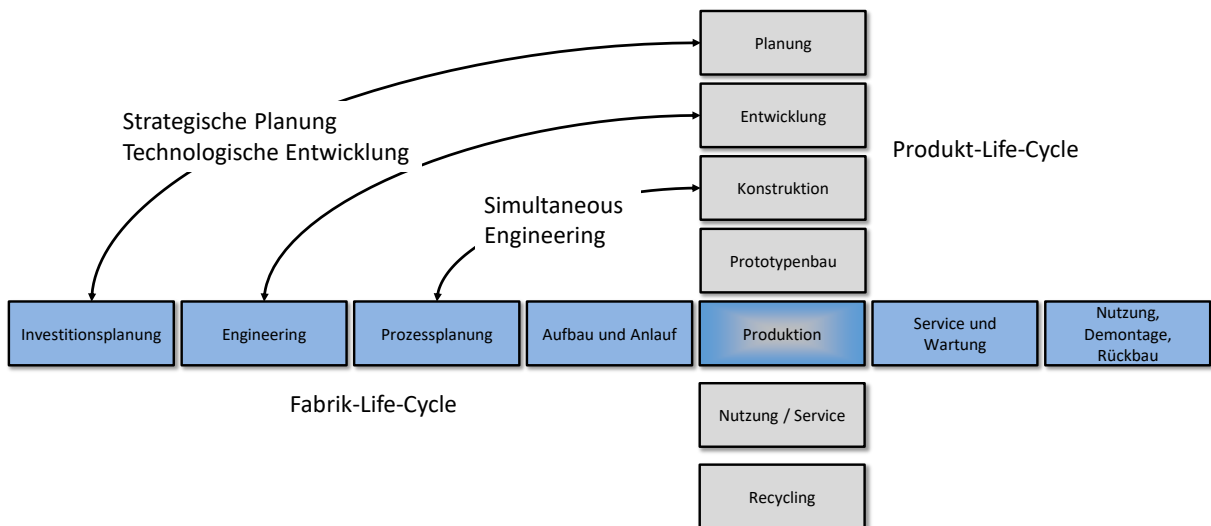


Abbildung 2.23 Vernetzung von Produktentwicklung und Produktionsentwicklung nach [Eign, Stelz]

Anfangs war die Digitale Fabrik als fehlendes Bindeglied zwischen der Produktentwicklung und der Produktherstellung gedacht (wie in Abbildung 2.24 zu sehen ist). Jedoch hat sich das ursprüngliche Anwendungsgebiet hinsichtlich Unterstützung im Produktionsanlauf und zur produktionsbegleitenden Serienbetreuung erweitert [Saue]. Anwendungsfelder sind nach [Eign, Stelz] unter anderem heute auch CAM, Manufacturing Process Planning Management, Fabriklayout Simulation sowie Optimierung und Rapid Prototyping. Virtuelle Techniken, wie digitale Prototypen, sind damit ein wesentlicher Bestandteil der Digitalen Fabrik. Das Werkzeug des digitalen Prototypens wird nachfolgend erläutert.

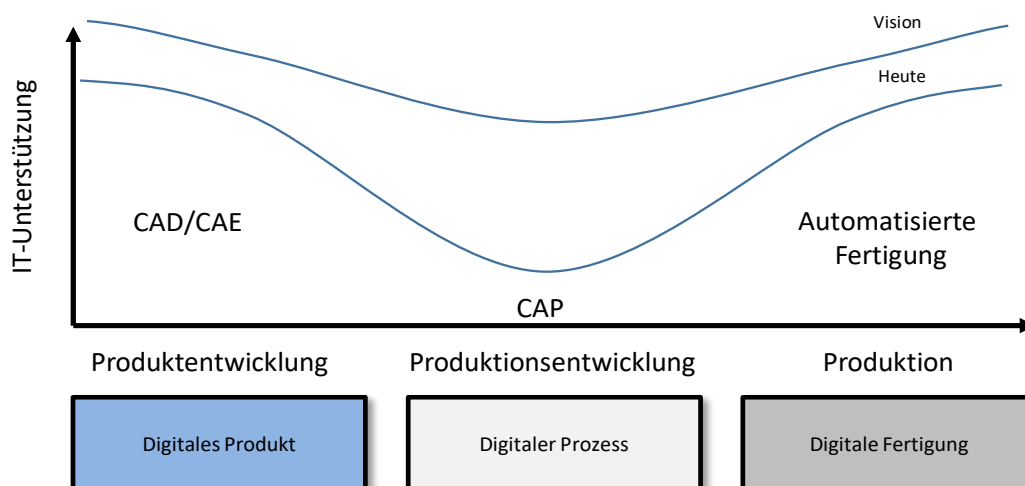


Abbildung 2.24 Die digitale Fabrik als Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Produktherstellung [Vajn, Webe]

### 2.2.2.2 Der digitale Prototyp

Hauptaufgaben der digitalen Prototypen bilden Varianten des Produktes zur Absicherung verschiedener Anforderungen. Die in der Berechnung erzeugten Ergebnisse können im Anschluss beim Aufbau von Hardware (z. B. Erprobungs- und Bestätigungsfahrzeuge) zur Validierung herangezogen werden. Bedingt durch die Komplexität des Produktes ergeben sich unterschiedlichste Anforderungen an digitale Prototypen. So benötigt eine Simulation für den Bereich Noise, Vibration, Harshness (NVH) andere Daten und Datenformate als eine Aerodynamik-Simulation oder eine Toleranzsimulation. Die wesentliche Herausforderung beim Einsatz von digitalen Prototypen ist daher die simulationsgerechte Bereitstellung von geometrischen und funktionalen Daten. Dies kann mitunter Veränderungen in der Organisationsform oder im Prozessablauf erfordern [Eign, Stelz].

So kann es vorkommen, dass Daten früher in das digitale Produktmodell einfließen müssen. Ein deutlich früherer Abzug der Daten durch zusätzliche Datenbereitstellungspunkte kann notwendig werden. Weiterhin muss über eine domänenübergreifende Speicherung von Informationen mithilfe standardisierter Austauschformate nachgedacht werden. Dadurch kann während des Produkt- und Produktionsentwicklungsprozesses frühzeitig ein sehr hoher Reifegrad der Entwicklungsdaten des Produktes und der Produktionsanlage erreicht werden (vgl. Abbildung 2.25) [Ovtc]. Der Aufbau von Hardware Prototypen kann damit wesentlich früher erfolgen, wodurch sich die Produktentwicklungszeit verkürzt.

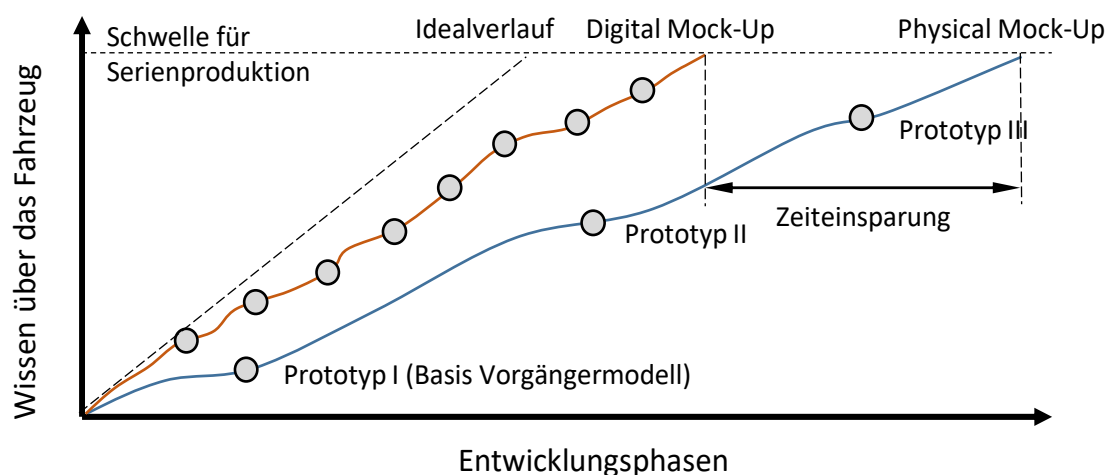


Abbildung 2.25 Reduzierung der Entwicklungszeit durch digitale Prototypen [Ovtc]



### 2.2.3 Organisation des Produktionsentwicklungsprozesses

Generell gibt es nach [Ehre, Meer] verschiedene Formen der Organisation von Unternehmen. Bei sequenzieller Produktentstehung erfolgt zumeist eine Gliederung nach Funktionsbereichen (Entwicklung und Konstruktion, Einkauf und Materialwirtschaft, Produktion, Verkauf und Marketing etc.), die in sich noch weiter untergliedert sind. Große Unternehmen wie beispielsweise Automobilhersteller folgen dagegen einer Gliederung nach Produktbereichen. Dabei wird das Produkt in verschiedene Bereiche zergliedert (Antriebsstrang, Karosserie, Produktionsplanung etc.). Crossfunktionale Bereiche stellen die Integrationsfähigkeit der einzelnen Module sicher (z. B. Packaging, Toleranzmanagement). Aufgrund der hohen Komplexität des Produktes findet bei der PKW-Entwicklung noch eine dritte Organisationform Anwendung. Hierbei werden die Phasen der Produkterstellung wie folgt gegliedert: Forschung, Vorentwicklung, Serienentwicklung, Erprobung, Aufbau. Dabei erfolgt durch spezielle Bereiche eine fortlaufende Beratung der federführenden Abteilungen (z. B. Festigkeitsberechnungen, Fahrdynamik, Ergonomie etc.). Eine weitere Organisationsform stellt die Gliederung nach Marktbereichen und Regionen dar. Auch eine Untergliederung nach Projekten ist gängig.

Wie dargestellt kommt bei der PKW-Entwicklung eine Mischform aus der produktbezogenen Organisation und der phasenbezogenen Produkterstellung zum Einsatz. Oftmals finden sich auch noch Elemente der funktionalen Organisation [Ehre, Meer]. Grundprinzip der Matrixorganisation bildet die Einsetzung des Produkt- bzw. Projektverantwortlichen, dessen Aufgabe die bereichsübergreifende Koordination des Erstellungsprozess ist. Ergänzt wird dieser durch Funktionsverantwortliche (Konstruktionsleiter), in dessen Fachbereich die Ausarbeitung der verschiedenen Produktarten erfolgt. Abbildung 2.26 zeigt die Matrixorganisation nach [Ehre, Meer] mit angedeuteter phasenbezogener Produkterstellung.

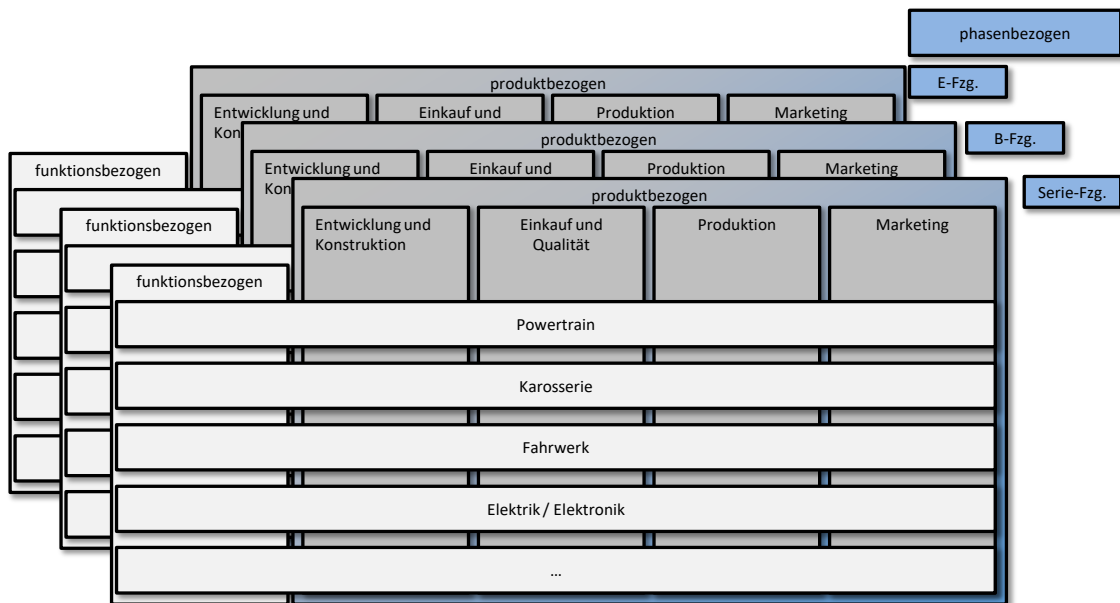


Abbildung 2.26 Matrixorganisation als Mischform bei der Automobilentwicklung in Anlehnung an [Ehre, Meer]

Die Verwendung von Werkzeugen der Digitalen Fabrik macht organisatorische Anpassungen in verschiedenen Bereichen erforderlich [VDI4499]. Demnach kann die Digitale Fabrik auf zwei verschiedene Arten im Unternehmen implementiert werden. Beiden liegt die Organisation der Digitalen Fabrik als eigenständiges Projekt zugrunde, dem die Unterstützung unterschiedlicher Fachdisziplinen zugesichert werden muss.

Die erste Möglichkeit der Integration der digitalen Fabrik nach [Ehre, Meer] bildet dabei die Installation eines Stabs-Projektmanagers, dem es ermöglicht wird, die notwendigen Kompetenzen aus den einzelnen Fachbereichen zu beziehen. Der größte Vorteil dieser Struktur liegt in ihrer einfachen Umsetzung. Die funktionale Hierarchie der Unternehmensorganisation bleibt erhalten. Problematisch an dieser Art der Organisationsform der Digitalen Fabrik ist die möglicherweise mangelnde Akzeptanz des Stabsprojektleiters in den einzelnen Fachbereichen. Dies kann zu Verzögerungen in der Entscheidungsfindung sowie zur Überlastungen der Geschäftsleitung aufgrund der direkten Unterstellung des Stabsprojektleiters führen.

Die zweite Art der Organisationsform der Digitalen Fabrik ist die Gründung eines eigenständigen Funktionsbereichs innerhalb der Unternehmensstruktur. Es erfordert die Zusammenfassung der zur Projektbewältigung benötigten Mitarbeiter. Vorteil dieser Organisationsform ist die nachhaltige Einführung der Digitalen Fabrik. Die beteiligten Kräfte können dem Projekt ihre volle Konzentration widmen, wodurch eine Identifikation mit dem Projekt stattfindet, was zu einem verstärkten Verantwortungsgefühl führt. Konfliktfreie

Koordinationsarbeit sowie schnelle Reaktion auf sich wandelnde Anforderungen sind weitere Vorteile dieser Organisationsform. Als Schwachpunkte werden neben dem aufwendigen Aufbau in laufende Unternehmensstrukturen auch ein unwirtschaftlicher Ressourceneinsatz durch schlechte Auslastung im Gesamtprojekt angeführt. Innerhalb der oben genannten Matrixorganisation bildet die Digitale Fabrik somit einen weiteren funktionsbezogenen Balken wie in Abbildung 2.27 dargestellt.

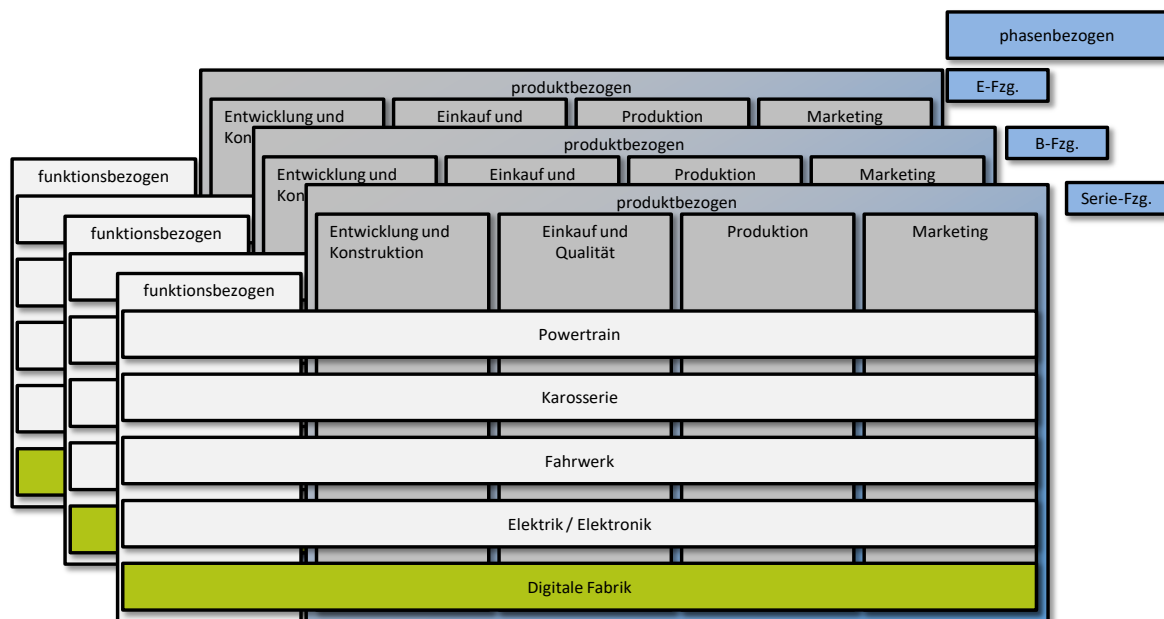


Abbildung 2.27 Die digitale Fabrik in der Matrixorganisation in Anlehnung an [Ehre, Meer]

Neben der Organisation sind auch die im Produktionsentwicklungsprozess eingesetzten Systeme wichtig.

#### 2.2.4 Systeme (IT-Tools) innerhalb des Produktionsentwicklungsprozesses

Zur Produktionsentwicklung stehen zahlreiche Systeme zur Verfügung. Diese lassen sich in die erweiterte Definition des PDM-Begriffes einordnen. Nach [Eign, Stel] erfolgte seit den 90er Jahren ein Wandel vom PDM-System zum PLM-System hin. Grundlage dafür bilden die immer stärkere Vernetzung der Einzelsysteme und deren Daten sowie ein ausgereiftes Kommunikationsmanagement innerhalb des PDM-Systems. Dadurch konnte dieses in ein vollständiges LifeCycle-Management-System überführt werden. Die wesentlichen Aufgaben / Anwendungsfelder eines solchen PLM-Systems liegen nach [Eign, Stel] im Produktdatenmanagement (PDM) und in der Engineering Collaboration (Zusammenarbeit über Unternehmens- und Standortgrenzen hinweg). Hinzu kommen Anwendungen im Bereich des Supply Chain Managements, dem Produkt Portfolio Management und dem

Kundenanforderungsmanagement [AMR]. Erweitert werden die Aufgaben eines PLM-Systems noch um die Funktionen Governance and Compliance und Produktionsprozessmanagement. Abbildung 2.28 zeigt die Komponenten einer solchen PLM-Lösung nach [Eign, Stel].

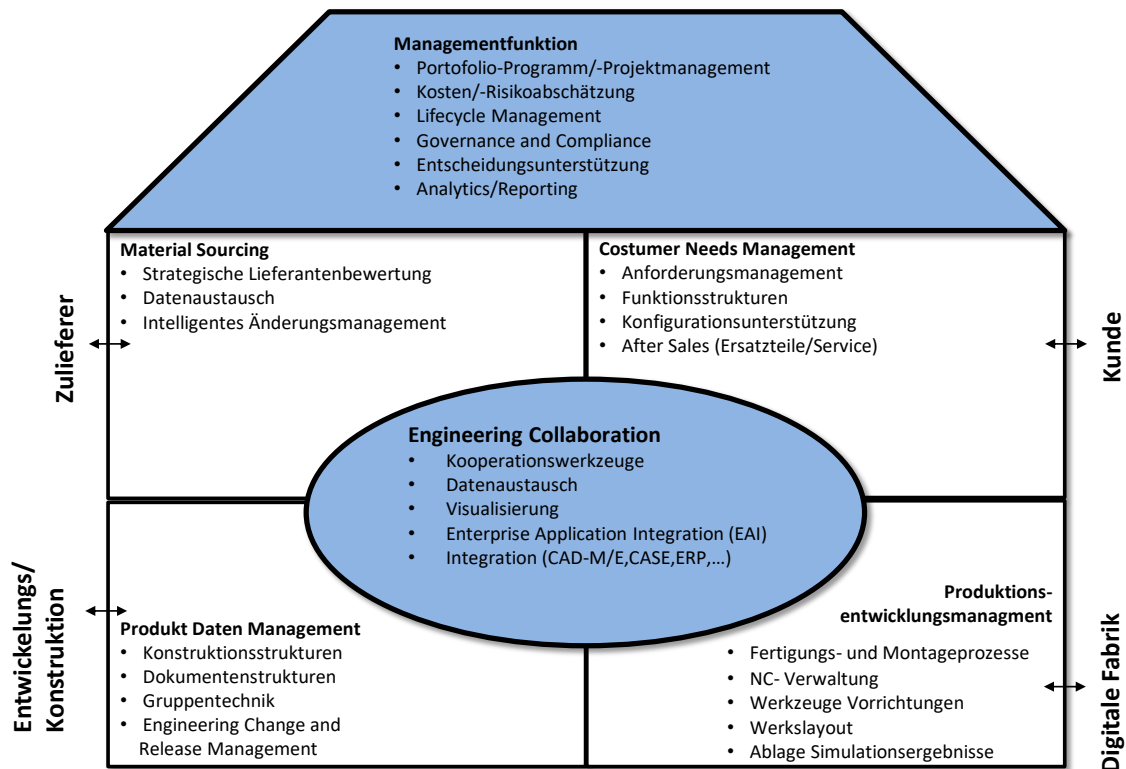


Abbildung 2.28 Komponenten eines PLM-Systems nach [Eign, Stel]

Die Umsetzung einer PLM-Lösung kann nicht durch einen simplen Austausch einer Software erfolgen; vielmehr handelt es sich dabei um eine Lösungsstrategie, bei der mehrere IT-Systeme miteinander interagieren. Durch die zahlreichen Schnittstellen und die heterogene Systemlandschaft auch innerhalb eines Unternehmens ist es oft schwierig, dem PLM-Lösungsansatz zu folgen wie in Abbildung 2.29 ersichtlich ist [Abra, Schu]. Weitreichende Eingriffe in die Systemlandschaft und das Überwinden zahlreicher Schnittstellen sind nötig. Standardisierte Austauschformate wie XML oder AML können hier helfen [www06].

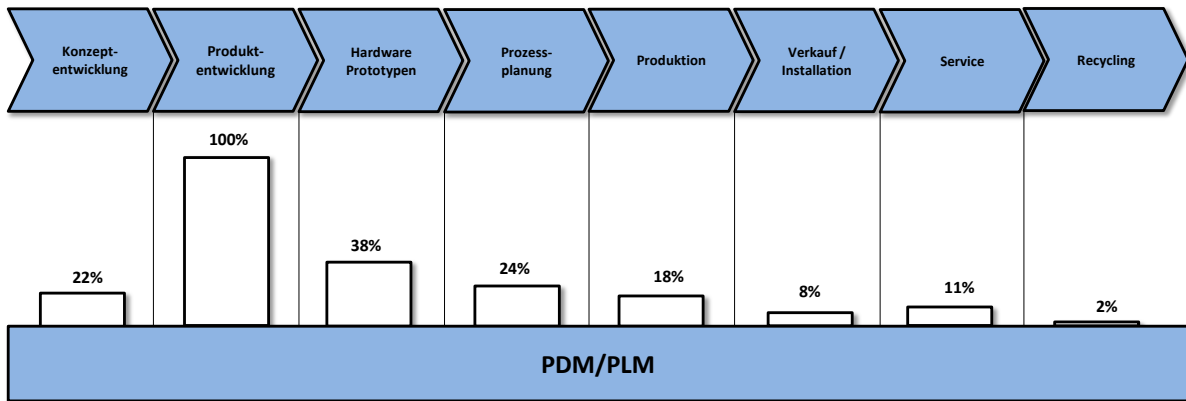


Abbildung 2.29 Einsatz von PLM-Lösungen im Produktlebenszyklus nach [Abra, Schu]

### 2.2.5 Produktionsentwicklungsmodelle in der Praxis

In der Praxis kommen in der Produktionsentwicklung vorwiegend Werkzeuge wie die Digitale Fabrik zum Einsatz. Dabei gilt es im automobilen Umfeld beispielsweise die folgenden Aufgaben zu lösen, die auch im PMP entsprechend festgelegt sind [Litw1]:

- Absicherung des Produkts in Kombination mit dem Herstellprozess
- Planung und Absicherung des Prozesses (Materialfluss etc.)
- Aufbau der Produktionsanlagen
- Festlegen von Rohbauumfängen (Fügefølge, Planung der Rohbaupresswerkzeuge etc.)
- Absicherung und digitale Baubarkeitsprüfung für Zusammenbauten (Zugänglichkeit von Schweißzangen etc.)
- Aufbau der Fahrzeuge (E-Fzg., B-Fzg., Serie)

Zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses ist sicher zu stellen, dass das entstehende Produkt im weiteren Entwicklungsprozess auch nach produktionsgerechten Gesichtspunkten konstruiert und ausgelegt wird, sodass es sich mit den zur Verfügung stehenden Maschinen bzw. geplanten Maschinen auch fertigen lässt. Die generelle Machbarkeit muss zum entsprechenden Quality Gate nachgewiesen werden. Außerdem müssen die Grundzüge der produktionsgerechten Gestaltung im ersten Konzeptheft festgehalten werden (Quality Gate I). Im Anschluss daran startet die digitale Absicherung mit der Überprüfung erster Konzepte. Mit fortschreitender Entwicklung bezieht sich die Absicherung dann überwiegend auf die Serienproduktion des Fahrzeugs. Unter der digitalen Absicherung ist dabei z. B. das Prüfen von

verschiedenen Fertigungsprozessen, Anlagenkonzepten, Kollisionsprüfungen, der Logistik und Materialflusssimulationen zu verstehen. Parallel dazu wird entschieden, an welchem Standort das Produkt zukünftig produziert werden soll. Dazu sind Standortfaktoren wie Stückzahl, Zielmärkte, Derivate, Fertigungstiefe etc. ausschlaggebend. Nach Festlegung des Standorts (Quality Gate H) wird ein erstes Groblayout der Produktionsanlage erstellt und fortlaufend weiter verfeinert (Q-Gate F). Zwischen den Quality-Gates H und F erfolgt auch der Aufbau des digitalen Prototyps, der in dieser Phase zur digitalen Absicherung unterschiedlicher Belange wie Crash, Baubarkeit, Zugänglichkeit für Schweißzangen etc. herangezogen wird. Nach erfolgreicher digitaler Absicherung erfolgt auf der weiter ausdetaillierten Datenbasis der Aufbau von Erprobungsfahrzeugen mithilfe von Musterteilen. Dabei müssen erste Vorrichtungen zum Aufbau erstellt werden. So lässt sich der Produktionsprozess erstmals anhand von Hardware bewerten und es können Aussagen über mögliche Verbesserungspotentiale getroffen werden. Die digitale Absicherung der Produktionsanlage erfolgt dabei synchron mit der Entstehung des Fahrzeugs. Synchronisationspunkte zwischen den Fachabteilungen bilden hier entsprechende Meilensteine: P-Freigabe (Produktionsfreigabe), W-Freigabe (Werkzeugfreigabe) und schließlich Blank-Freigabe (Serienfreigabe). Einen wichtigen Punkt in der Produktionsplanung bildet die Absicherung des Spann- und Fixierkonzepts, wodurch die endgültige Fügefolge des Produkts innerhalb der Anlage festgelegt wird. Diese endgültige Festlegung erfolgt zwischen den Quality Gates E und D. Beim Durchschreiten von Quality Gate D werden erste Serienwerkzeuge für Presswerk-Rohbauteile konstruiert. Ferner werden mit fortschreitendem Entwicklungsprozess die entsprechenden Fahrzeugtypen (Bestätigungsfahrzeug und Vorserienfahrzeug) in der dazu vorgesehenen Anlage aufgebaut. Die Fahrzeuge können mit Fertigstellung der Presswerkzeuge sukzessive mit serienwerkzeugfallenden Teilen bestückt werden. Zum Abschluss der Entwicklung der Produktionsanlage erfolgen der Aufbau und die Inbetriebnahme der Anlage am entsprechenden Standort [Günz].

Die Vorteile der Umsetzung der Digitalen Fabrik bei der Daimler AG liegen in der Effizienzsteigerung bei der Planung und bei der Produktion, was sich durch eine höhere Auslastung in den Produktionswerken zeigt. Änderungskosten im Anlauf sinken und der Planungsreifegrad steigt bedingt durch die enge Vernetzung mit dem Produktentwicklungsprozess basierend auf einer durchgängigen Datenbasis [Eiss]. Bei der Audi AG werden Vorteile in der verkürzten Entwicklungszeit sowie ein Zugewinn der

Produktqualität und eine Reduzierung der Entwicklungskosten gesehen [Fors]. Die Volkswagen AG verspricht sich auch vorwiegend Kostensenkungen (Herstellungskosten, Anlaufkosten) durch die Einführung der Digitalen Fabrik; aber auch eine Qualitätsverbesserung der Produkte sowie Reduzierungen in der Entwicklungszeit. [Geck]. Selbiges verspricht sich auch die BMW AG. Dieses Unternehmen hat - wie die anderen auch - im Hinblick auf die Digitale Fabrik in den letzten Jahren einen großen Wandel durchlebt. Bei allen genannten Unternehmen erfolgte eine schrittweise Umsetzung der Digitalen Fabrik von softwaretechnischen Insellösungen hin zu vollvernetzten Systemen wie in Abbildung 2.30 zu sehen ist [Reit].

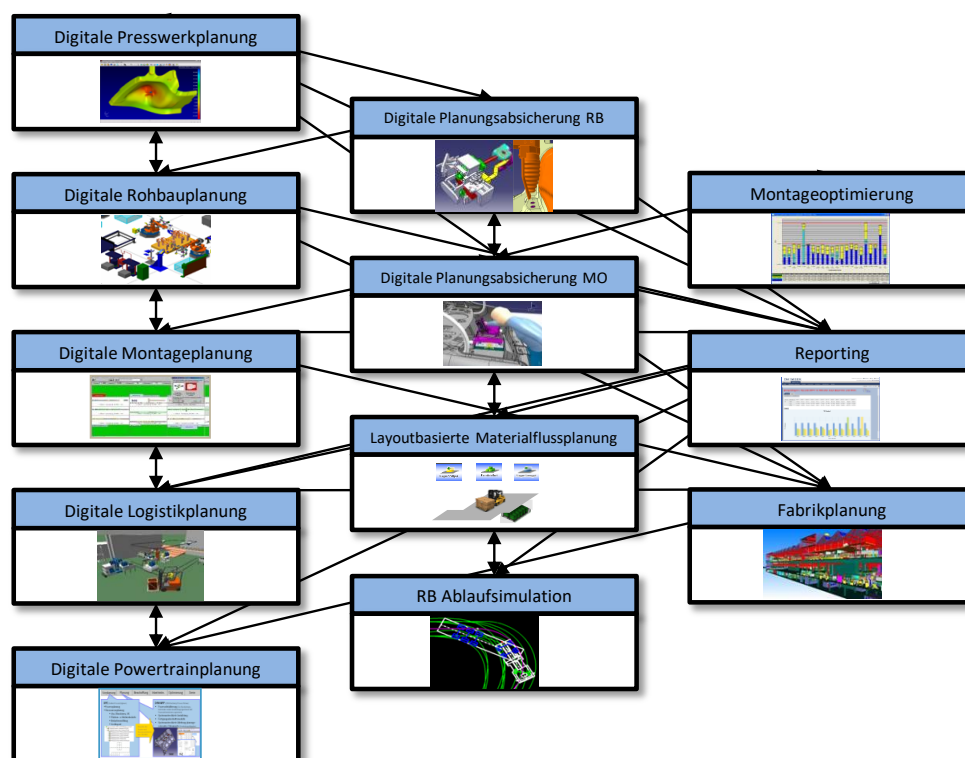


Abbildung 2.30 Die Digitale Fabrik als vollvernetztes System im Entwicklungsprozess in Anlehnung an [Reit]

[Litw2]

## 2.2.6 Informationen und Daten des Produktionsentwicklungsprozesses

Zur Einordnung der entstehenden Daten und Informationen des Produktionsentwicklungsprozesses wird auf das sog. Y-Modell nach [Hirz, Diet, Gfre, Lang] eingegangen. Die linke Seite dieses Modells repräsentiert dabei die betriebswirtschaftlichen Aspekte der industriellen Zusammenarbeit. Basierend auf Verkaufsprognosen entstehen dabei Kapazitätsaussagen über die zu produzierenden Produkte, die sich im Laufe des Planungsprozesses immer weiter verfeinern. Abschluss der Planungsphase bildet die

Einstellung des ersten Produktionsauftrags, wodurch die Schnittstelle zur Produktion entsteht. Auf der rechten Seite des Y-Modells befindet sich der Produktentstehungsprozess. Dieser ist getrieben von Kundenanforderungen sowie Methoden zur Validierung der im Entwicklungsprozess umgesetzten Anforderungen. Dabei kommen Anwendungen aus dem Bereich des CAE zum Einsatz, um Anforderungen in die frühe Entwurfsphase mit einfließen zu lassen. Eine weitere Detaillierung erfolgt dann mittels CAD-Systemen, wobei auch eine Anreicherung des Modelles mit Metadaten erfolgt (Toleranzinformationen, Fügetechnik, Material etc.). Zur rechnergestützten Planung der Produktionsanlage ermöglichen EDM-Systeme einen bereichsübergreifenden Datenaustausch in CAP, CAM und CAQ -Systeme. Abbildung 2.31 zeigt das Y-Modell nach [Hirz, Diet, Gfre, Lang].

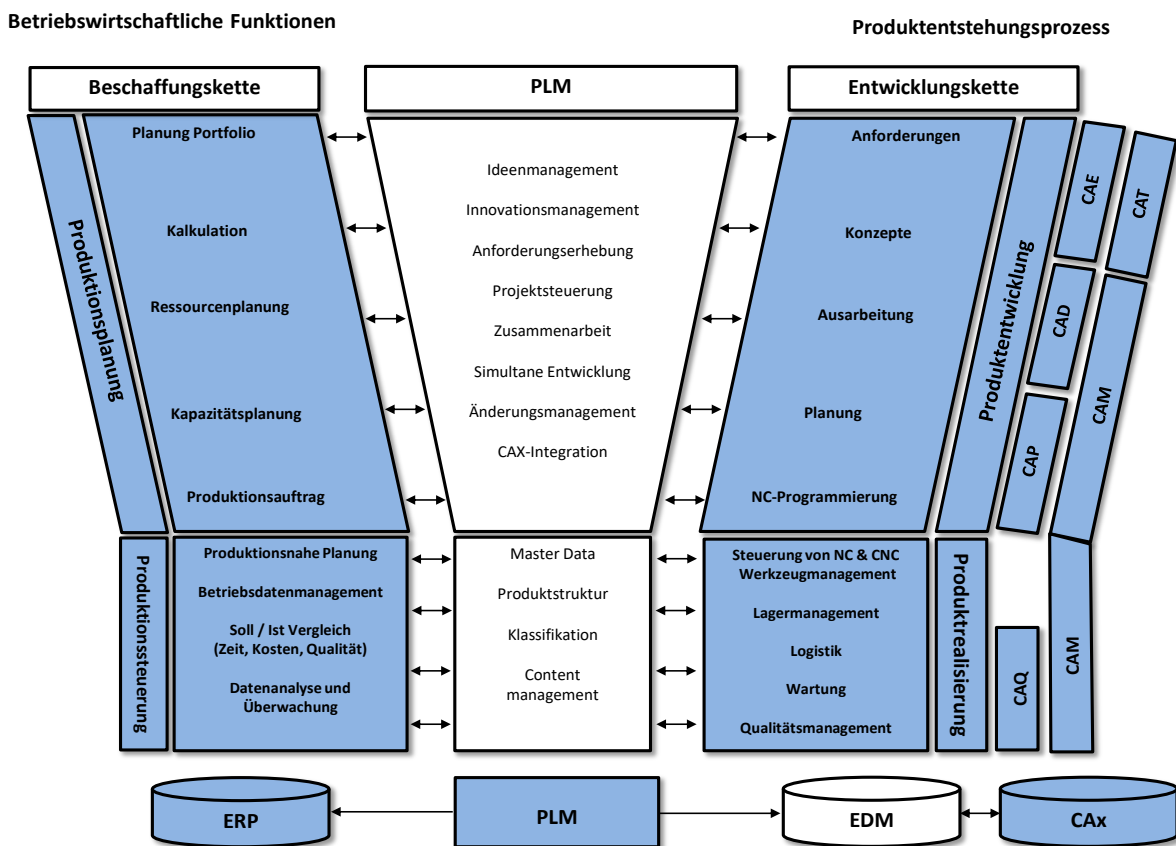


Abbildung 2.31 Y- Modell nach [Hirz, Diet, Gfre, Lang]

## 2.2.7 Das Spann- und Fixierkonzept im Produktionsentwicklungsprozess

Beim Erstellen der Fügefolge muss die Produktionsplanung u. a. beachten, wie die Einzelteile und Zusammenbauten in der entsprechenden Anlage gespannt und fixiert werden können. Zur Dokumentation wird das Spann-/ und Fixierkonzept (SFK) erstellt. Es bildet die Basis der späteren Vorrichtungskonstruktion und ist das zentrale Element der Schnittstelle zwischen



Produktentwicklung und Entwicklung der Produktionsanlage. Nachfolgend werden die wesentlichen Elemente des SFK aufgezeigt.

Generell lassen sich die Elemente des SFKs zur Aufnahme von Bauteilen in der Vorrichtung in zwei Hauptgruppen unterteilen: in flächige Auflagen und in Aufnahmen durch Fixierstifte.

### **2.2.7.1 Flächige Auflagen**

Bei flächigen Auflagen wird zwischen ungespannten und gespannten Auflagen unterschieden. Abbildung 2.32 zeigt den ungespannten und den gespannten Auflagetypen aus dem Werkzeugkatalog, sowie die Anwendung in einer entsprechenden Vorrichtung. Die Auflagefläche (Konturstein) der beiden Typen beträgt z. B. bei der Daimler AG standardmäßig 20mm x 20mm. Zum Ausgleich von Fertigungstoleranzen werden Abstimmplatten, sowie Shimspakete in die entsprechenden Netzrichtungen<sup>4</sup> des Spanners eingebracht. Bei einem gespannten Auflagetypp ist die Drehachse des Spanners so zu wählen, dass sie in einer Ebene mit der Auflagefläche des späteren Bauteils liegt. Damit wird sichergestellt, dass der Spanner immer orthogonal zur gespannten Bauteilfläche schließt und sich das Bauteil beim Spannen nicht verschiebt.

---

<sup>4</sup> Unter der Netzrichtung ist die Wirkrichtung des Spanners zu verstehen. Die Wirkrichtung der Spanner vom Typ flächige Auflagen ist stets normal zur Flanschfläche orientiert.

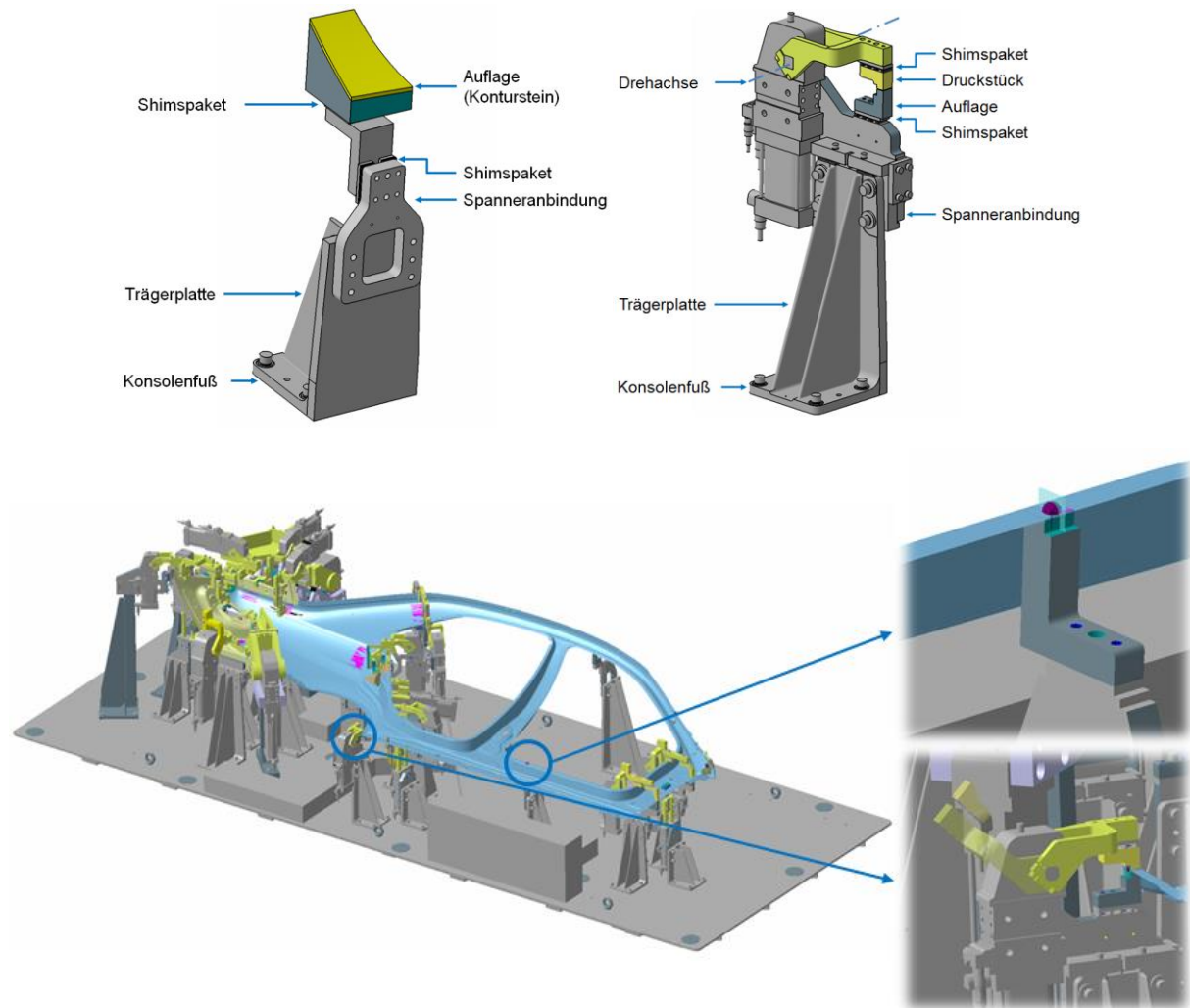


Abbildung 2.32 Spanntyp Auflagern (ungespannt und gespannt)

### 2.2.7.2 Fixierstifte

Fixierstifte lassen sich grundsätzlich in starre und ziehbare Fixierstifte unterteilen; wobei standardmäßig der ziehbare Fixierstift verwendet wird. Abbildung 2.33 zeigt die beiden Fixierstifttypen aus dem Werkzeugkatalog sowie die entsprechende Anwendung an einer Vorrichtung. Die Einstellbarkeit der Fixierstifte in Netzrichtung<sup>5</sup> ist durch entsprechende Abstimmplatten und Shimspakete sichergestellt, die Wirkachse des Fixierstifts muss normal zur Bauteilfläche liegen. Ein Verdrehen des Fixierstifts ist durch eine Schulterung der Verschraubungsfläche zu vermeiden. Auch pastillenförmige<sup>6</sup> Fixierstifte sind möglich.

<sup>5</sup> Unter der Netzrichtung bei Fixierstiften sind deren Wirkrichtungen zu verstehen. Die Wirkrichtungen sind dabei zwei Vektoren, die normal zur Mantelfläche des Fixierstiftes stehen und orthogonal zueinander liegen.

<sup>6</sup> Die Form einer Pastille entspricht einem Ellipsoid.

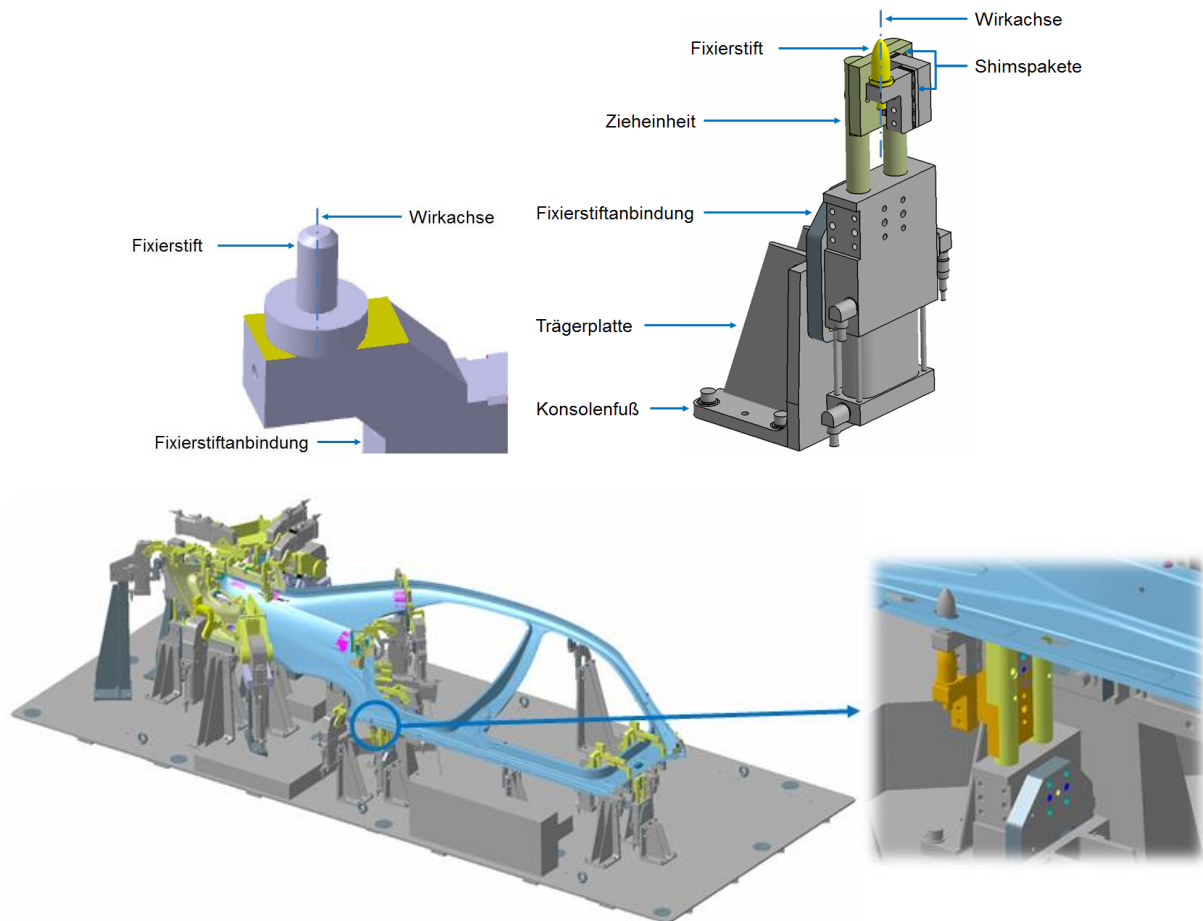


Abbildung 2.33 Spanntyp Fixierstifte (starr, ziehbar)

### 2.2.7.3 Repräsentation des SFK im CAD

Die Darstellung des Spann-/ und Fixierkonzepts im CAD-Modell erfolgt in der Regel vereinfacht durch Kugeln, Zylinder sowie durch Ebenen und Richtungsvektoren.

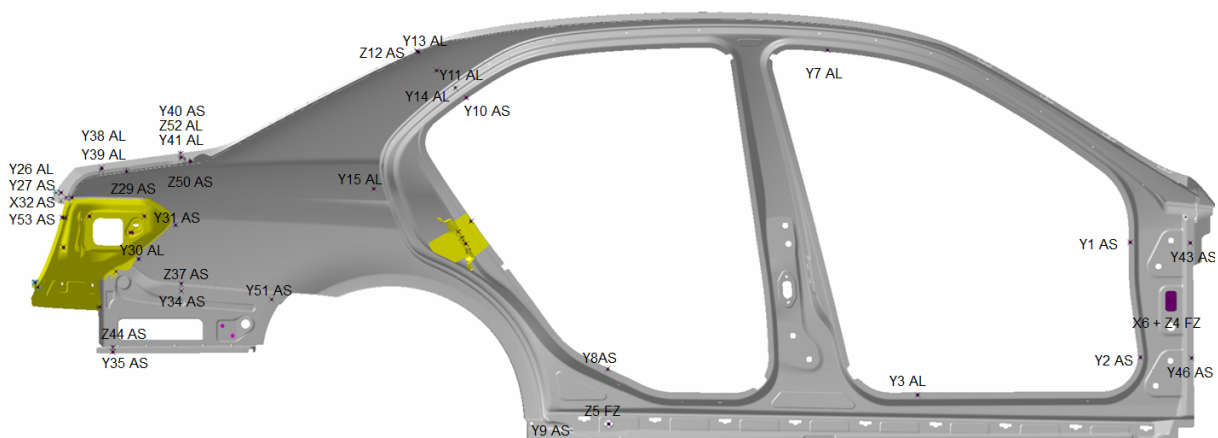
Ein Spanner vom Typ Auflage kann durch eine Kugel, einen Vektor, eine Ebene und ein Label repräsentiert werden. Der Mittelpunkt der Kugel definiert den Spannungspunkt am Bauteil. Der Radius bestimmt den Toleranzbereich für Auflage und Druckstück ( $\pm 10\text{mm}$ ). Ein Vektor gibt an, auf welcher Seite des Bauteils sich die feste Auflage befindet. Weiterhin enthält die Kugel eine Schnittebene, auf der später Bezugsstellen normgerecht erstellt werden können. Außerdem enthalten die vereinfachten Spannstellen fortlaufend nummerierte Label, die die Wirkrichtung der Spannstelle identifizieren (AL - Auflage ungespannt, AS - Auflage gespannt). Die Wirkrichtung wird dabei im Fahrzeugkoordinatensystem angegeben, das sich gemäß Definition in der Mitte der Vorderachse jedes Fahrzeugs befindet, wobei die *x-Achse* entgegen der Fahrtrichtung, die *y-Achse* in Fahrtrichtung nach rechts und die *z-Achse* nach oben zeigen.

Der Spanner vom Typ Fixierstift wird dagegen repräsentiert durch einen Zylinder, einen Vektor, eine Ebene und ein Label. Der Zylinder repräsentiert dabei den Bolzen bzw. den pastillenförmigen Fixierstift. Der Vektor gibt die Bolzenziehrichtung an (entsprechend der Wirkrichtung). Eine Schnittebene bildet die Basis zur Erstellung normgerechter Bezugsstellen. Diese Elemente besitzen eine Beschriftung in einem entsprechenden Label (FZ - Fixierstift ziehbar, FS - Fixierstift starr), sowie eine fortlaufende Nummerierung.

#### 2.2.7.4 Methode des Spann- und Fixierkonzepts

Zur Aufnahme starrer Bauteile innerhalb einer Vorrichtung sind pro Bauteil grundsätzlich drei Auflagestellen in der primären Koordinatenrichtung, zwei Aufnahmestellen in der sekundären Koordinatenrichtung und eine Aufnahmestelle in der tertiären Koordinatenrichtung ausreichend. In Bezug auf eine Loch - Langlochausrichtung, wie durch das SFK zumeist realisiert, hat die primäre Aufnahmestelle im Regelfall drei Spannstellen vom Typ Auflage (AL oder AS). Die sekundäre Aufnahmestelle bildet ein Fixierstift in einem Langloch (FZ oder FS) und die tertiäre Aufnahmestelle, ein Fixierstift in einer kreisrunden Bohrung (FZ oder FS). Bei flexiblen Bauteilen (Karosserierohbau) kann die Anzahl der Aufnahmestellen in Richtung der maßgeblichen Verformung (z. B. durch Schwerkraft, Prozesskräfte, Prüfkräfte) stark variieren. So enthält beispielsweise die Seitenwand links eines Fahrzeugs bis zu dreißig Aufnahmestellen in der primären Koordinatenrichtung (y-Richtung).

Das Spann- und Fixierkonzept einer Baugruppe (ZB Seitenwand außen rechts) ist in Abbildung 2.34 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass das Spann- und Fixierkonzept die Ausrichtung eines jeden Bauteils in der jeweiligen Zusammenbaustufe bestimmt.



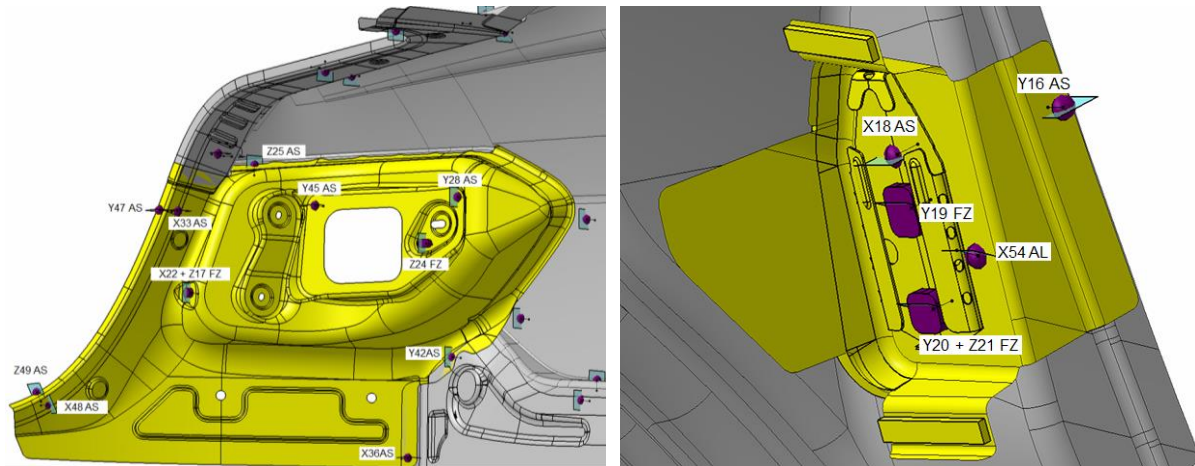


Abbildung 2.34 Spann- und Fixierkonzept / 3-2-1-Aufnahme

Die Reihenfolge in der die Spanner und Bolzen zu bedienen sind ist eindeutig festgelegt. Zunächst sind alle ziehbaren Bolzen auszufahren und das Bauteil ist auf diesen zu platzieren, wodurch gleichzeitig die Ablage auf den entsprechenden primären Auflageflächen erfolgt. Anschließend sind die Spanner; die den Fixierlöchern am nächsten liegen; zu schließen, was die sekundäre und tertiäre Ausrichtung gewährleistet. Diese Spanner müssen in Achsrichtung des Bolzens schließen. Zum Abschluss erfolgt das Schließen der übrigen Spanner.

## 2.2.8 Grundlagen der Messtechnik

Zur Sicherstellung der Qualitätsanforderungen und zur ständigen Verbesserung des Fertigungsprozesses ist eine Prüftechnik unabdingbar. Die Zuverlässigkeit der Prüftechnik ist direkt abhängig von einer funktionierenden Prüfmittelüberwachung; wie sie durch die DIN 32937 [DIN32937] geregelt ist. Die Prüftechnik lässt sich generell in objektives und subjektives Prüfen untergliedern, wobei im Karosserierohbau nur objektive Prüfverfahren Anwendung finden. Abbildung 2.35 zeigt die Gliederung der Prüftechnik [Weck].

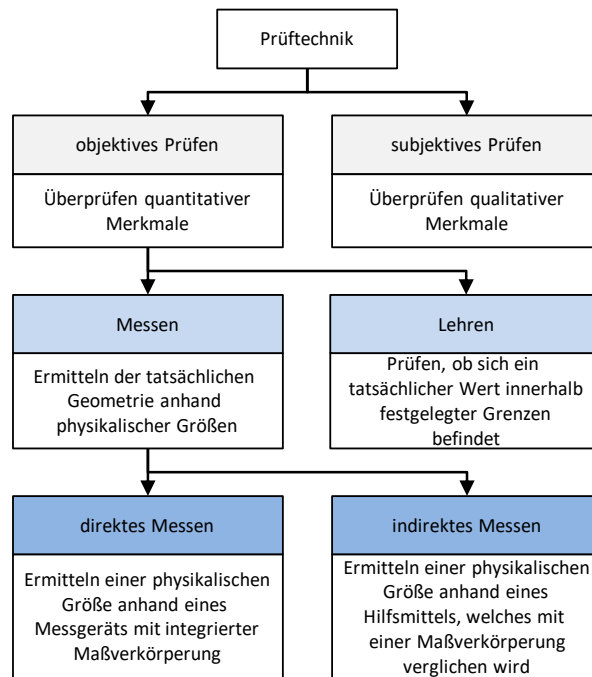


Abbildung 2.35 Gliederung der Prüftechnik nach [Weck]

### 2.2.8.1 Objektive Prüfverfahren im Karosserierohbau

Nachfolgend werden die drei gängigsten objektiven Prüfverfahren im Karosserierohbau erläutert.

- *3D-Koordinatenmesstechnik:*

Durch die Koordinatenmesstechnik lassen sich definierte Messpunkte taktil erfassen und auf entsprechende Bezüge referenzieren. Als Bezüge gelten generell jene, welche seitens des Spann- und Fixierkonzepts und des Toleranzmanagements bestimmt wurden. Abweichende Bezüge / Bezugsstellen werden dabei innerhalb der Messstrategie erfasst. Die Antastrichtung eines Messpunkts wird anhand eines zuvor definierten Ortsvektors festgelegt. Der gemeinsame Ursprung aller Messpunkte wird entweder durch Antasten der Bezugspunkte ermittelt oder über das Fahrzeugkoordinatensystem bestimmt. Durch den Abgleich mit den im CAD hinterlegten Solldaten kann zu jedem Messpunkt eine Aussage bezüglich Richtung und Betrag getroffen werden. Nachteil der 3D-Koordinatenmesstechnik ist, dass die taktile Messung eine Berührkraft auf das Bauteil ausübt, was zu seiner Verformung führen kann, was somit eine Messunsicherheit darstellt [Weck].

- *Optoelektronische Messtechnik:*

Das Grundprinzip der optoelektronischen Messtechnik beruht auf der Triangulation. Dabei wird eine Beleuchtungsquelle auf das Messobjekt gerichtet und die Reflektion von einem

Objektiv mit integriertem Sensor aufgezeichnet. Je nach Dimension der verwendeten Beleuchtungsquelle (Laserpunkt, Laserlinie, Streifenmuster) lassen sich Punkte, Konturen oder ganze Flächen aufnehmen. Diese können anschließend mit Punkten, Konturen oder Flächen der Sollgeometrie des CAD-Modells verglichen werden. Ein Vorteil des optoelektronischen Messverfahrens besteht in einer präzisen, sehr schnellen und robusten Messlösung. Es entstehen qualitativ hochwertige Messdaten, wobei das System eine große Flexibilität besitzt. Nachteile dieses Verfahrens liegen in den Einflussgrößen der Sensorik. So können Reflektionen an Schweißpunkten, Verunreinigungen der Oberflächen in Form von Fetten oder Ölen zu fehlerhaften Messergebnissen führen und suggerieren eine Abweichung des Bauteils von der Soll-Geometrie [Weck].

- *Lehren:*

Mithilfe von Lehren lassen sich Geometrieelemente auf ihre Form und Lage prüfen. So kann ermittelt werden, ob ein Geometrieelement innerhalb definierter Spezifikationsgrenzen liegt. Der Betrag der Abweichung lässt sich nicht explizit feststellen, lediglich die Richtung der Abweichung ist erkennbar. Das Prinzip des Lehrens verfolgt die Idee des Prüfens der Verbaubarkeit von Bauteilen. Anwendung findet das Prüfverfahren durch Lehren um beispielsweise die Lage von Lochbildern zu überprüfen, die zur Anbindung anderer Bauteile oder Zusammenbauten notwendig sind [Weck].

### **2.2.8.2 Beispiel einer Messstrategie zum Messen von Fugen und Versatz, Absicherung von Funktionsmaßen im Automobilbau**

Um eine hohe Reproduziergenauigkeit sowie Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, ist es nötig, Fehlerquellen beim Durchführen von Messungen zu minimieren. Aus diesem Grund existiert für alle zu messenden Geometriemerkmale der Daimler AG eine Mess- und Antaststrategie. Dabei haben sich für die Aufnahme und Ausrichtung der Bauteile / Baugruppen entsprechende Regeln bewährt, welche anschließend genauer erläutert werden.

#### **Setzen von Bezügen und Bezugsstellen**

Beim Setzen von Messbezügen ist darauf zu achten, dass sich diese bestmöglich am Spannungspunkt aus dem Spann- und Fixierkonzept orientieren (z. B. zulässige Abweichung bei der Daimler AG:  $15\text{mm}$  ( $a$ )). Weiterhin müssen sie auf derselben Ebene wie der Spannungspunkt liegen (hervorgehobene Fläche). Die Entfernung zur Wurzelnaht sollte bei einem etwaigen

Verschieben gleich bleiben ( $b$ ). Abbildung 2.36 zeigt den Zusammenhang an einem einfachen Beispiel [Rich].

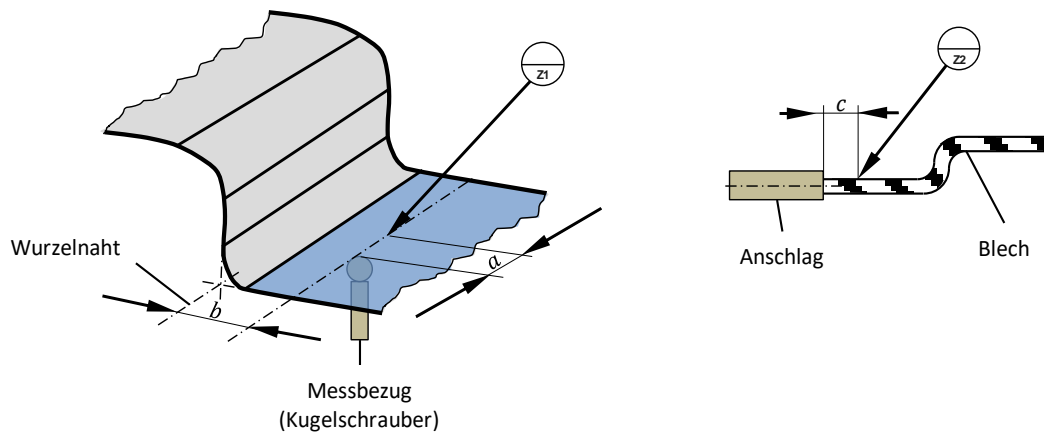


Abbildung 2.36 Spezifikationen für Bezüge und Bezugsstellen

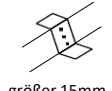


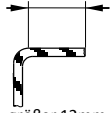
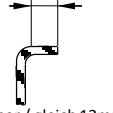

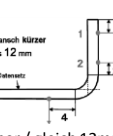
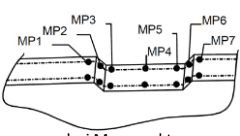
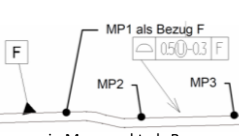
Außerdem sind die Kugelschrauber zur Aufnahme der Bauteile entlang der Flächennormalen des Geometrieelements auszurichten. Liegen Bezüge an Fixierlöchern, sind Absteckbolzen zu verwenden. Weist das Geometrieelement, auf welchem ein Fixierloch liegt, einen Winkel von mehr als  $12^\circ$  zur netzparallelen Fläche der Messaufnahme auf, sind zylindrische Absteckbolzen zu verwenden. Liegt eine Bezugsstelle an einem Beschnitt, darf hier die Abweichung des Messanschlags maximal 15mm von der Bezugsstelle entfernt liegen ( $c$ ).

### Setzen von Messpunkten

Die angeführten Vorgaben gelten auch für die Erstellung von Messpunkten. Je nach Abstand zweier Konstruktionslinien ist eine unterschiedliche Anzahl an Messpunkten festzulegen. Dies gilt auch für die Anzahl und Lage der Messpunkte an Flanschen. Generell gilt, dass Messpunkte bei CNC-Antastung  $4\text{mm}$  nach einem Radenauslauf zu setzen sind (bei handgeführter Antastung  $2\text{mm}$ ). Tabelle 2.4 gibt einen Überblick der zu setzenden Messpunkte bei entsprechender Ausprägung der Geometrieelemente.



Tabelle 2.1 Überblick der zu setzenden Messpunkte

	Abstand / Länge		
Messpunkte zwischen zwei Konstruktionslinien	 größer 15mm	 zwischen 5mm und 15mm	 zwischen 5mm und 15mm
Messpunkte für unterschiedliche Flanschlängen	 größer 12mm	 kleiner / gleich 12mm	
Abstände der Messpunkte bei unterschiedlichen Flanschlängen	 größer 12mm	 kleiner / gleich 12mm	
Messpunkte an Durchsetzungen	 drei Messpunkte	 ein Messpunkt als Bezug	

Zur Ermittlung von Bohrungsmittelpunkten verschiedener Locharten existieren weitere Antaststrategien.

**Strategie zur Messung von Fugen und Versatz**

Um beim Vermessen von Fugen und Versatz Ergebnisse zu erhalten, kann die Ausrichtung des Messmittels variieren. Dies hat jedoch entscheidenden Einfluss auf das Messergebnis. Weil die Vorgaben aus dem Fugen- und Radienplan eindeutig zu prüfen sind, ist die Richtung festgelegt, in der Fuge und Versatz zu vermessen sind. Abbildung 2.37 stellt vier verschiedene Möglichkeiten zur Vermessung von Fugen gegenüber.

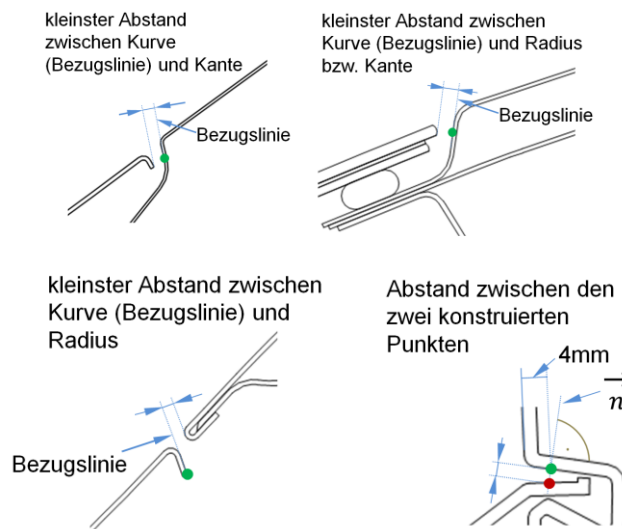


Abbildung 2.37 Messstrategie beim Messen von Fugenspalten

Beim Vermessen von Fugen wird die Basis zumeist aus einer Bezugslinie gebildet. Einer der beiden Messpunkte (Bezugsmesspunkt) liegt auf dieser Bezugslinie und ist laut Messstrategie  $4\text{mm}$  nach Radienauslauf zu setzen (grün). Die Messrichtung entspricht der Normalen des Geometrieelements, auf welchem der Messpunkt liegt. Der zweite Messpunkt zum Ermitteln des Fugenmaßes liegt zumeist am Ort des kleinsten Abstands zwischen den zu vermessenden Teilen. Ausnahme bildet der letzte dargestellte Fall in Abbildung 2.37. Bei dieser Art von Fugen ist vom Bezugsgeometrieelement parallel im Abstand von  $4\text{mm}$  im Fugeninneren ein Messpunkt zu erstellen (grün). Die Normale dieses Punkts schneidet das gegenüberliegende Bauteil und legt so den zweiten Messpunkt zum Ermitteln des Fugenmaßes fest.

Der Versatz zwischen zwei Bauteilen, welche durch eine Fuge getrennt sind, lässt sich generell folgendermaßen ermitteln. Am Bezugselement ist der Messpunkt  $4\text{mm}$  nach Radienauslauf zu setzen. Die Normale des Geometrieelements am entsprechenden Messpunkt bildet die Messrichtung. Der zweite Messpunkt ist ebenfalls  $4\text{mm}$  nach Radienauslauf des gegenüberliegenden Bauteils zu setzen. Abbildung 2.38 verdeutlicht diesen Zusammenhang sowie einen Sonderfall (rechts). Dieser lässt sich über entsprechende Lehren auf die Maßhaltigkeit prüfen.

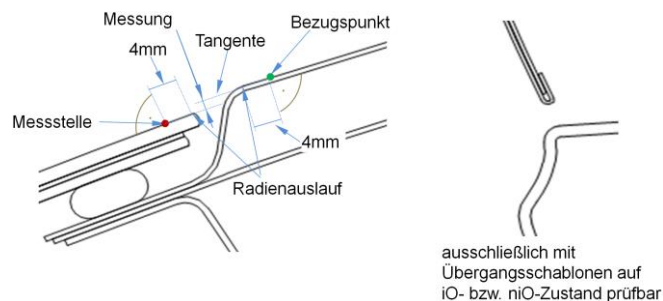


Abbildung 2.38 Messstrategie zum Messen von Fugenversatz

## 2.3 Toleranzmanagement im Automobilbau

In der Serienproduktion muss gewährleistet sein, dass die produzierten Bauteile / Baugruppen von gleichbleibend hoher Qualität und Präzision sind. Bei der Herstellung von Bauteilen / Baugruppen treten fertigungsbedingte Abweichungen von der Nominalgeometrie auf. Deswegen ist es nötig, in einer frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses gleichermaßen hohe Qualitätsanforderungen an die Bauteile / Baugruppen zu stellen.

Aufgabe des Toleranzmanagements ist es, für einzelne Bauteile / Baugruppen unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Vorgaben Toleranzen zu vergeben. Unter

einer Toleranz ist die zulässige Abweichung von Form, Maß und Lage (z. B. im CAD) zu verstehen [Klei2]. Der Kern des Toleranzmanagements liegt in der Absicherung der Funktionserfüllung sowie einer ansprechenden Produktästhetik. Dabei spielen zeitlich und räumlich abweichende Herstellungsprozesse der Bauteile eine Rolle (verschiedene Zielwerke zur Produktion), deren Umsetzbarkeit durch eine entsprechende Tolerierung sicherzustellen ist. Zudem lässt sich durch eine funktionsgerechte Tolerierung die Austauschbarkeit von einzelnen Bauteilen sicherstellen.

Daraus resultiert folgende Definition für das Toleranzmanagement: „Das Toleranzmanagement ist ein Teilprozess des Entwicklungsprozesses mit dem Ziel, die Funktionserfüllung eines Produkts mittels Managementmethoden bei möglichst geringen Herstellkosten durch ein optimales Toleranzkonzept sicherzustellen.“ [Bohn, Hets]

### **2.3.1 Normative Grundlagen**

Zur Erstellung dieses Konzepts kann das Toleranzmanagement auf ein solides Fundament entsprechender Normen zurückgreifen. Eine Norm bezeichnet dabei Formulierung, Herausgabe und Anwendung von Regeln, Leitlinien oder Merkmalen und spiegelt den aktuellen Stand der Technik wider [DIN 45020]. Am Beispiel des Produktentwicklungsprozesses nach dem MDS existieren zu jedem Abschnitt des Prozesses aus Kapitel 2.1.4.1 entsprechende Normen, die einen einheitlichen Standard sowohl am Produkt als auch im Prozess festlegen (Gestaltungsnormen, Auslegungsnormen, Produktionsnormen, Sicherheits-, Qualitäts- und Prüfnormen etc.). Sie dienen zur späteren Zertifizierung des Produkts / Prozesses. Ferner lässt sich dadurch die technische und kommunikative Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Abteilungen sowie mit Lieferanten und zwischen unterschiedlichen Produktionsorten verbessern. Zusätzlich zu national und international gültigen Normen existiert innerhalb der Daimler AG eine interne Normung (MBN, Mercedes-Benz-Norm), welche sowohl intern als auch von Zulieferern einzuhalten ist. Tabelle 2.1 zeigt einen Auszug aus relevanten nationalen / internationalen sowie internen Normen für den Bereich Toleranzmanagement.

Tabelle 2.2 Relevante Normen im Toleranzmanagement Karosserierohbau

Normbezeichnung	Titel
DIN EN ISO 1101	Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf
DIN EN ISO 14405-1/2	Geometrische Produktspezifikation (GPS) Dimensionale Tolerierung
DIN EN ISO 8015	Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen Konzepte, Prinzipien und Regeln
DIN EN ISO 2692	Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Maximum-Material-Bedingung
DIN EN ISO 5458	Geometrische Produktspezifikation (GPS) Form- und Lagetolerierung, Positionstolerierung
DIN EN ISO 5459	Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Bezüge und Bezugssysteme
DIN EN ISO 286-1/2	Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Toleranzsysteme für Längenmaße
MBN 11011	Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Bemaßung und Tolerierung (GD&T)
MBN 10273	Zusammenbauten im Karosserierohbau – Allgemeintoleranzen
MBN 36012	Pressteile aus Metall bis 3mm Blechdicke, Allgemeintoleranzen

## 2.3.2 Grundlagen und Begrifflichkeiten des Toleranzmanagements

### 2.3.2.1 Grundlagen zu Bezügen und Bezugssystemen

Um die Funktionserfüllung eines Bauteils zu gewährleisten, ist die zulässigen Abweichungen der Gestalt durch Toleranzen einzuschränken. Zur normgerechten Tolerierung, aber auch zur Ausrichtung der Bauteile im Raum, werden dabei Bezüge oder Bezugssysteme benötigt, die im Folgenden näher erläutert werden.

Unter einem Bezug versteht man „ein geometrisch exaktes Geometrieelement, auf das eine Toleranz bezogen werden kann“ [DIN 5459]. Dabei ist zwischen Bezügen zu unterscheiden, die auf das gesamte Geometrieelement verweisen und jenen, die sich nur auf einen Teil eines Geometrieelements beziehen (künftig als Bezugsstellen bezeichnet). Letztere können gemäß der Norm auf Flächen, Linien oder Punkte zeigen. Dargestellt wird eine solche Bezugsstelle in einer technischen Zeichnung durch einen Kreis, den eine waagerechte Linie teilt. Im unteren Bereich steht die Benennung des Bezugs, im oberen Bereich stehen teilweise zusätzliche Informationen wie z. B. die Größe der Bezugsstelle. Im Karosserierohbau kommen

hauptsächlich nur diese Bezugsstellen zum Einsatz, da hier vornehmlich nicht formstabile, dünnwandige Bauteile verwendet werden.

Zur vollständigen toleranzgerechten Beschreibung eines Bauteils / einer Baugruppe wird ein Bezugssystem benötigt. Als Bezugssystem definiert [DIN 5459] eine „Menge von zwei oder mehreren Situationselementen, gebildet aus zwei oder mehreren Bezugselementen in einer festgelegten Anordnung“. Anzahl und Benennung der Bezugsstellen richtet sich dabei nach der 3-2-1-Ausrichtung; d.h. drei Bezugsstellen zur primären Ausrichtung, zwei zur sekundären Ausrichtung und eine zur tertiären Ausrichtung. Die Benennung erfolgt dabei nach folgendem Schema:

Zunächst wird die Koordinatenwirkrichtung der entsprechenden Bezugsstelle eingetragen. Innerhalb der MBN 11011 wird hier unterschieden, ob es sich um das Fahrzeugkoordinatensystem oder das Bauteilkoordinatensystem handelt (A,B,C oder X,Y,Z). Anschließend folgt eine Nummer. Dabei enthalten die Primärbezüge die Nummern 1 bis 3, Sekundärbezüge die Nummern 4 und 5 und der tertiäre Bezug die Nummer 6. Alle weiteren Bezüge, die erforderlich sind um flexible Bauteile funktionsgerecht zu tolerieren, erhalten die Nummerierung 7-n mit vorangestellter Wirkrichtung. Außerdem existieren zum Vermitteln von Bauteilen bei der Montage Bezugsstellen, die sich aus jeweils zwei individuellen Bezugsstellen ergeben. Solche Bezugsstellen sind, anschließend an die entsprechende Nummerierung, mit einem a oder b zu versehen [MBN 11011].

### **2.3.2.2 Grundlagen zu Toleranzen**

Das Eintragen der Toleranzen erfolgt nach entsprechenden Normen (DIN EN ISO 1101, MBN 11011). Grundsätze zur Tolerierung im Karosserierohbau werden nachfolgend ausführlich beschrieben.

Ein toleriertes Element besteht immer aus einem Hinweis Pfeil, sowie einem Toleranzrahmen. Dieser beinhaltet die folgenden Informationen [DIN 1101] [MBN 11011]:

- Toleranzsymbol des tolerierten Merkmals (toleriertes Geometrieelement)
- Toleranzwert (Einheit analog der Längenmaßeinheit, ggf. mit Durchmessersymbol wenn die Toleranzzone kreis- bzw. zylinderförmig ist)
- Buchstabe des Bezugs oder Bezugssystems, auf welches sich das tolerierte Merkmal bezieht (nicht jedes Toleranzsymbol benötigt einen Bezug). Enthält ein toleriertes

Element mehrere Bezüge (maximal drei), so steht der erste Bezug für die primäre, der zweite für die sekundäre und der dritte für die tertiäre Ausrichtung.

Ist eine Linie (Kurve) oder Fläche zu tolerieren, so muss der Hinweisfeil des tolerierten Elements auf dieses Geometrieelement zeigen. Deshalb ist er deutlich versetzt zur Maßlinie anzubringen. Sollen hingegen eine Achse bzw. Mittelebene oder ein Punkt eine Toleranz erhalten, so muss der Hinweisfeil des Toleranzrahmens direkt an die Maßlinie anschließen. Abbildung 2.39 verdeutlicht diesen Zusammenhang [Klei1].

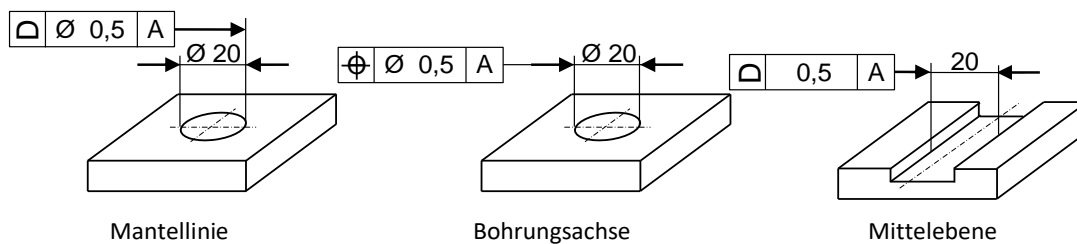


Abbildung 2.39 Tolerierte Elemente nach DIN EN ISO 1101

### 2.3.2.3 Grundlagen der Toleranzanalyse

#### Maßketten

Montiert man die abweichungsbehafteten Einzelteile zu Baugruppen, so streuen auch die Funktionsmaße (Schließmaße) in einem gewissen Bereich. Grund dafür sind Maßketten, welche durch den Zusammenbauprozess entstehen. Maßketten sind der zentrale Aspekt der Toleranzanalyse. Es sei angemerkt, dass es auch an Einzelteilen zu Maßketten kommen kann, nämlich dann, wenn Bauteile mehrere Funktionsflächen aufweisen. In Abbildung 2.40 ist die Maßkette einer Baugruppe dargestellt. Dabei sind drei Einzelteile (Kisten) in eine Vorrichtung zu legen, wobei alle drei Bauteile ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ) sowie die Vorrichtung ( $x_4$ ) selbst abweichungsbehaftet sind.

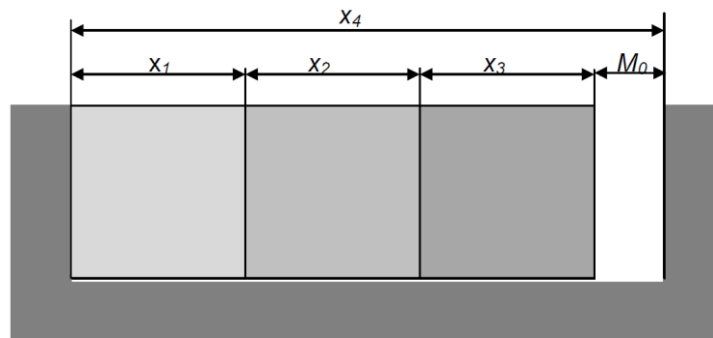


Abbildung 2.40 Beispiel einer linearen Maßkette mit Funktionsmaß  $M_0$

Das Schließmaß der Baugruppe sei hier  $M_0$ . Der funktionale Zusammenhang zwischen den einzelnen Maßen lautet dann wie folgt (die Maßrichtung ist durch das entsprechende Vorzeichen zu beachten, vgl. Erstellung eines Maßplans in [Mane]):

$$M_0 = f(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_4 - x_3 - x_2 - x_1 \quad (2.1)$$

Weisen die Toleranzen der Einzelteile (wie im vorliegenden Fall) betragsmäßig den selben Richtungsvektor auf, so handelt es sich bei der Funktion der Schließmaßtoleranz  $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$  um eine lineare Maßkette, andernfalls um eine nichtlineare Maßkette. Das Aufstellen dieser Maßkette erfolgt dann durch die Verwendung von Linearitätskoeffizienten ( $\alpha_n$ ) [Mane].

Weisen die Geometrieparameter der Einzelteile ( $x_1, x_2, x_3, x_4$ ) wie im vorliegenden Fall Abweichungen auf, so entsteht über die Maßkette auch eine Abweichung des Schließmaßes. Durch die Toleranzanalyse wird die Abweichung des Schließmaßes genau definiert.

### Beitragsleister

Der Anteil der Einzelteiltoleranzen an der Streuung des Schließmaßes lässt sich über sogenannte Beitragsleister prozentual bestimmen. Grundsätzlich berechnen sich die Beitragsleister analytisch aus der Gesamtstandardabweichung aller Toleranzen und der Standardabweichung der jeweiligen Einzeltoleranz nach [Klei2].

$$B_{Ti} = \frac{s_i^2}{s_0^2} \cdot 100 \quad (2.2)$$

$$s_0^2 = \sum_{i=1}^n s_i^2 \quad (2.3)$$

Die Standardabweichung berechnet sich aus dem Mittelwert des Schließmaßes mehrerer Stichproben  $\bar{x}$  und der Messung des Merkmalwerts an einem Einzelteil  $x_i$ .

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{s^2} \quad (2.4)$$

Im Falle einer Normalverteilung der Toleranzen (wovon hier ausgegangen werden soll) ist es auch möglich, die Standardabweichung durch die Toleranz auszudrücken. Erstrebenswert im automobilen Umfeld ist ein Toleranzfeld, welches der sechsfachen Standardabweichung entspricht.

$$T = 6 \cdot s \quad (2.5)$$

Bei nichtlinearen Maßketten muss auch hier durch die Bestimmung der Linearitätskoeffizienten eine Linearisierung vorgenommen werden. Allgemein lässt sich eine Maßkette nach Gleichung 2.6 beschreiben [Mane]:

$$M_0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot M_i \quad (2.6)$$

$M_0$  stellt dabei das Schließmaß der nichtlinearen Maßkette dar. Allgemein werden die Linearitätskoeffizienten über das totale Differenzial ausgedrückt. Es gilt Gleichung 2.7 [Mane]:

$$\alpha_i = \frac{\partial M_0}{\partial M_i} \quad (2.7)$$

Die Gesamtstandardabweichung errechnet sich bei nicht linearen Maßketten aus der Summe der Einzelstandardabweichungen der Einzeltoleranzen multipliziert mit den entsprechenden Linearitätskoeffizienten nach [Mane]:

$$s_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \cdot s_i^2} \quad (2.8)$$

Die Beitragsleister der Einzeltoleranzen errechnen sich nach Gleichung 2.2; wobei die Standardabweichungen der Einzeltoleranzen noch mit dem Linearitätskoeffizienten zu multiplizieren sind [Mane]:

$$\tilde{s}_i = \alpha_i \cdot s_i \quad (2.9)$$

### 2.3.3 Methodik des Toleranzmanagements

Zur Erarbeitung eines funktionsorientierten Toleranzdesigns stehen Methoden bereit, die hier ausführlicher erläutert werden. Diese erstrecken sich über den gesamten Produktentwicklungsprozess und orientieren sich an der Entwicklung mechatronischer Produkte nach VDI-Richtlinie 2221. Bei der Erarbeitung eines funktionsorientierten Toleranzdesigns erfolgt eine schrittweise Ausdetaillierung (siehe dazu auch Abbildung 2.41).



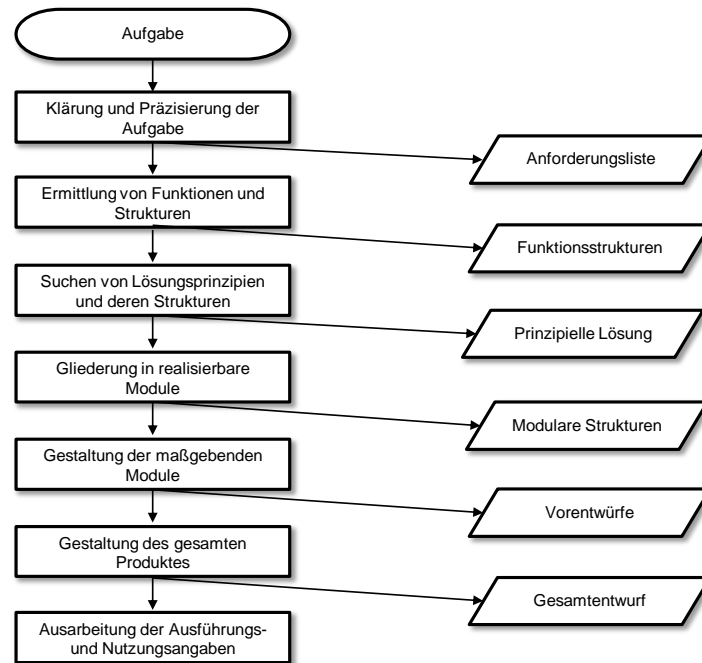


Abbildung 2.41 Vergleich VDI 2221 mit Toleranzmethode nach [Bohn, Hets2]

### 2.3.3.1 Festlegen der Anforderungen und Zergliederung in Funktionen

Analog wie in VDI-Richtlinie 2221 beschrieben, erfolgt zunächst das Festlegen der Produkthanforderungen. Diese müssen im nächsten Schritt durch die Zergliederung in die Funktionsstruktur weiter differenziert werden. Nach [Bohn, Hets2] muss ein Produkt während des Herstellprozesses eine Vielzahl an Funktionen erfüllen. Diese gliedern sich in Funktionen, die durch den Herstellprozess bedingt sind (.z. B. Positionierung von Bauteilen zueinander mittels einer Vorrichtung) und in Funktionen, die durch den Kunden erlebbar sind. Exemplarisch seien hier optische Funktionen wie Fugen- und Versatzmaße am Fahrzeug genannt; oder aber technische Funktionen wie eine funktionierende Kinematik des Heckdeckels sowie dessen Abdichtung gegen Umwelteinflüsse. Relevant aus Sicht des Toleranzmanagements sind primär Funktionen, die am Ende für den Kunden erlebbar sind. Es gilt, dass diese Funktionen „durch Maß-, Form- und Lageabweichungen beeinflusst“ werden, wodurch der Begriff „Funktionsmaß als Eigenschaft der Funktion“ zu definieren ist [Bohn, Hets2]. Das Funktionsmaß besteht damit neben dem nominalen Maß zusätzlich aus einem Wertebereich, in dem sich dieses Nominalmaß bewegen kann. Zur Gewährleistung der späteren Analysefähigkeit ist die Zuordnung einer eindeutigen Messmethode zu jedem Funktionsmaß notwendig. Nach Einhaltung des nominalen in Verbindung mit dem zulässigen Wertebereich kann die Funktionserfüllung gewährleistet werden. [Bohn, Hets2]. Zum

Auffinden der Funktionen erfolgt ein Zergliedern der Anforderungen und ihre Überführung in die Wirkstruktur bis hin zur Produktstruktur (vgl. Kapitel 2.3.2.). Eine gängige Methode zum Auffinden von funktionalen Zusammenhängen sowie zu ihrem besseren Verständnis bilden die in [Bohn, Hets2] genannten Leitfragen, die auch Abbildung 2.42 zeigt.

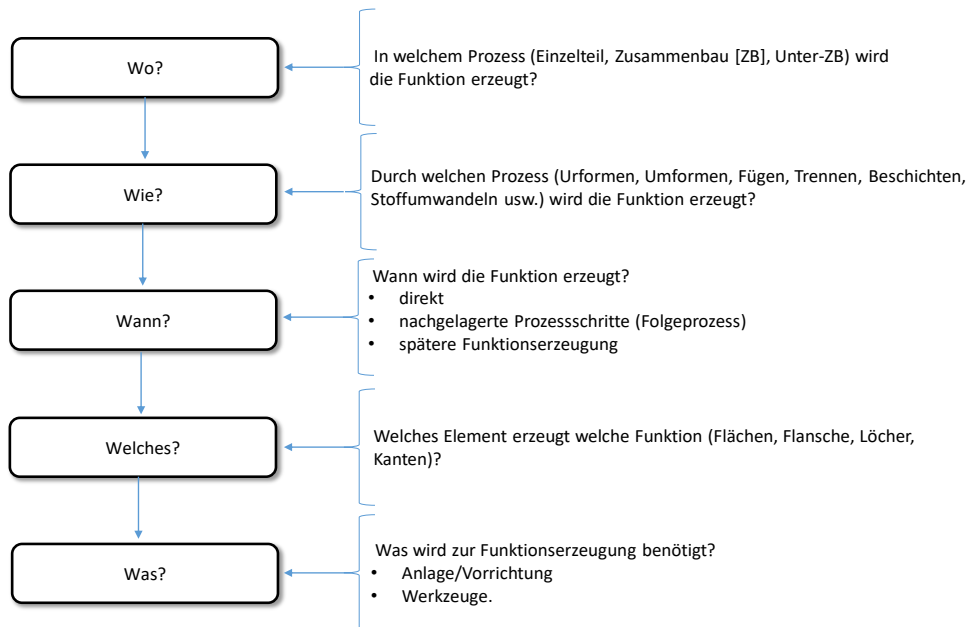


Abbildung 2.42 Leitfragen zur Klärung funktionaler Zusammenhänge nach [Bohn, Hets2]

### 2.3.3.2 Festlegen der Fügefolge und Fertigungsprozesse

Nach Festlegung der kundenrelevanten Funktionsmaße des Produktes, erfolgt die weitere Ausgestaltung der Komponenten und Bauteile. Dies geschieht wie in der VDI-Richtlinie 2206 dargestellt in den entsprechenden Fachdomänen. Dabei erfolgen die ersten Entscheidungen hinsichtlich der Fertigungsprozesse sowie der Fügefolge der einzelnen Bauteile und Baugruppen. In Kapitel 2.3.2 wurden bereits Beispiele für Entscheidungen zur funktionsorientierten Tolerierung hinsichtlich der Baumstruktur erwähnt. Folgende Entscheidungen müssen zusammen mit den Prozessbeteiligten getroffen werden:

- Zugänglichkeit und Verwendbarkeit von Schiebeflanschen zum Toleranzausgleich
- Aufnahmekonzepte der Zusammenbauten für die nächsthöhere Fügeoperation
- Integral- und Differenzialbauweise von Bauteilen
- Einfluss des Fügeverfahrens auf die Fügefolge (Zugänglichkeit)

Die Entscheidung über den Fügegraphen hat maßgeblichen Einfluss auf die Maßkette des entstehenden Funktionsmaßes. „Jede Änderung während des Projektes bezüglich der

Fügefølge, bzw. der Inhalte von Lieferantenzusammenbauten, kann gravierende Auswirkungen auf das Toleranzkonzept haben. Daher sind die Änderungen und mögliche Auswirkungen sehr genau zu prüfen“ [Bohn, Hets2]. Das Toleranzmanagement als Querschnittsfunktion muss hier unter Zuhilfenahme von Simulationsverfahren aus Kapitel 2.3.6 eine Aussage über zielführende Varianten treffen. Nachdem die Entscheidung über die prinzipielle Fertigungsstruktur des Produktes gefallen ist, erfolgt ihre Ausdetaillierung. Ausrichtungen und Aufnahmen für Bauteile und Zusammenbauten werden erarbeitet. Das Ausrichtkonzept beschreibt dabei die Ausrichtung des Bauteils zum Verbau in der nächsthöheren Fertigungsstufe.

Prinzipiell erfolgt die Ausrichtung pro Bauteil oder pro bereits gefügter Baugruppe. Müssen in einer Fügeoperation mehrere Bauteile miteinander gefügt werden, so kann sich die Ausrichtung auch über mehrere Bauteile erstrecken. Die Bezugsstellen der Einzelteile und Baugruppen finden sich im ersten Fall an den Kontaktflächen zur Vorrichtung. Im zweiten Fall dagegen können Bezüge auch an Kontaktflächen zu anderen Bauteilen liegen.

Je nach Art der Ausrichtung müssen nach [Bohn, Hets2] unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen (Toleranzen) an die beteiligten Bauteile gestellt werden.

Im ersten Fall - der Ausrichtung pro Bauteil, Baugruppe - existieren relativ geringe Anforderungen an die Genauigkeit der Einzelteile, lediglich der erforderliche Toleranzausgleich der gefügten Bauteile untereinander muss sichergestellt werden (z. B. genügend Flanschüberdeckung beim Fügen). Im zweiten Fall dagegen - Ausrichtung an den Fügeflanschen - müssen hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Einzelteile gestellt werden, da die Ausrichtung exakt an den funktionsrelevanten Stellen erfolgt.

### **2.3.3.3 Festlegen der Bezüge und der Bezugsstellen**

Die Ausrichtung der Bauteile erfolgt unter Zuhilfenahme von Bezügen und Bezugsstellen. Die Wahl der Bezugsstellen geschieht nach folgenden drei maßgeblichen Kriterien [Klei1]:

- Prozesssicherheit
- Formstabilität
- Verschleißsicherheit

Unter der Prozesssicherheit wird die hohe Wiederholgenauigkeit bei der Herstellung von Geometrieelementen verstanden, die als Bezug genutzt werden. Eine enge Absprache

zwischen Fertigung und Toleranzmanagement ist hier entscheidend. Prozesssichere Bezüge / Bezugsstelle liegen vor, wenn der folgende Zusammenhang erfüllt ist: Beim mehrfachen Vermessen (Bemustern) desselben Bauteils lässt sich die Formabweichung eines tolerierten Elements in ihrem Ausmaß reproduzierbar bestätigen.

Das Kriterium der Formstabilität erfordert die Definition von Bezügen und Bezugsstellen nur an bzw. in der Nähe von oder auf Teilen von Geometrieelementen, die während des gesamten Prozesses in geringem Maße von der Form abweichen. Sind Bezüge oder Bezugsstellen an Geometrieelementen erforderlich, die leicht verformbar sind, ist mit der Konstruktionsabteilung zu klären, inwiefern sich das Bauteil an dieser Stelle durch Versteifungen (Sicken, Verstrebungen etc.) stabiler gestalten lässt.

Die Verschleißsicherheit von Bezügen und Bezugsstellen drückt die Beständigkeit der Bauteile / der Baugruppen aus. Hierbei müssen die eigentliche Herstellung, die Montage im Herstellungsprozess sowie die Reparatur und Wartung berücksichtigt werden. Eine enge Absprache mit dem Produktionsbereich ist unbedingt erforderlich.

Sind diese Kriterien erfüllt, so kann die funktionsgerechte Vergabe der Bezugsstellen erfolgen. Dazu sind zunächst alle Geometrieelemente des Bauteils zu ermitteln, welche später eine Funktion erfüllen sollen. Es ist durchaus möglich und zu berücksichtigen, dass Geometrieelemente im späteren Zusammenbau mehr als nur eine Funktion erfüllen. Zur Auswahl eines Bezugs oder einer Bezugsstelle bezogen auf das jeweilige Geometrieelement findet sich in [Bohn, Hets2] die in Abbildung 2.43 dargestellte Entscheidungshilfe.

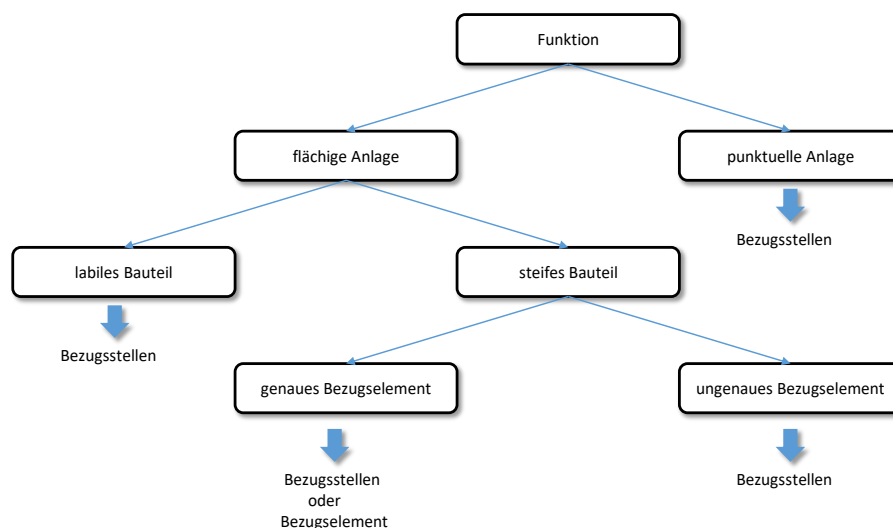


Abbildung 2.43 Wahl von Bezügen und Bezugsstellen nach [Bohn, Hets2]

Anschließend ist zu prüfen, ob die Funktionserfüllung durch eine definierte Allgmeintoleranz erreicht werden kann oder eine explizite Tolerierung erforderlich ist. Diesen explizit zu tolerierenden Geometrieelementen sind funktionsgerechte Bezüge / Bezugsstellen zuzuordnen. Generell sollten dabei toleranzrelevante Funktionen und Geometrieelemente zusammengefasst werden (geometrische Kopplung durch den Bezug) [Klei1]. Dies ist vor allem sinnvoll, wenn eine bestimmte Geometrieabweichung zwei Funktionen in gleichem Maße beeinflusst.

Das Erkennen des funktionalen Zusammenhangs mehrerer Bauteile über mehrere Zusammenbaustufen hinweg ist dabei keineswegs trivial und erfordert eine strukturierte Herangehensweise. Folgende gängige Vorgehensweise hat sich in der Praxis bewährt:

- Aufgliederung der Gesamtfunktion der Baugruppe in ihre einzelnen Teilfunktionen sowie Nebenfunktionen.
- Bestimmung der Teilfunktionen, welche eine explizite Tolerierung benötigen und welche sich durch Allgmeintoleranzen sicherstellen lassen.
- Unterteilung der zu tolerierenden Teilfunktionen in Geometrieelemente einzelner Bauteile, welche die Teilfunktion beeinflussen.
- Tolerierung der daraus resultierenden Geometrieelemente an den entsprechenden Bauteilen. (Falls mehrere Teilfunktionen von einem Geometrieelement beeinflusst werden, ist die Setzung eines Bezugs sinnvoll).

Abbildung 2.44 veranschaulicht diesen Zusammenhang nochmals.

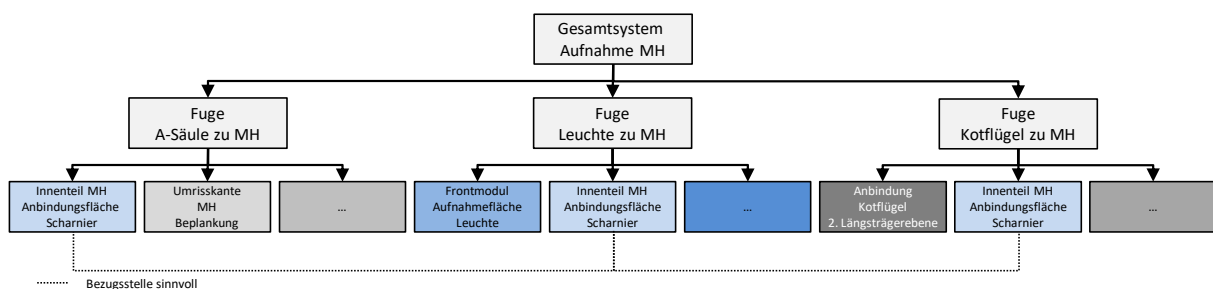


Abbildung 2.44 Zergliedern der Gesamtfunktion Motorhaube, sowie Zuordnung von Bauteilen und Geometrieelementen

In der Praxis kommt es häufig vor, dass mehrere Geometrieelemente Einfluss auf unterschiedliche Teilfunktionen haben. Die Auswahl der Bezugsstellen ist iterativ zu treffen und mithilfe entsprechender Toleranzsimulationen (vgl. Kapitel 2.3.6) abzusichern.

Bezugsstellen sind ferner so zu vergeben, dass eine Durchgängigkeit vom Bauteil zur Baugruppe und umgekehrt gewährleistet ist. Nur so kann von der Produktion der Bauteile im Presswerk, über deren Montage und Qualitätssicherung durch die Messtechnik eine optimale Analysefähigkeit der Bauteile und Baugruppen vorausgesetzt werden.

Grundsätzlich gibt es bei der durchgängigen Bezugsstellenvergabe zwei Methoden:

*Top Down - Bezugsstellenvergabe:*

Bei dieser Art der Bezugsstellenvergabe vererben sich die Bezugsstellen von der Baugruppe ins Einzelteil. Diese vollständige Übernahme garantiert die spätere optimale Analysefähigkeit. Sind an den einzelnen Bauteilen oder Unterbaugruppen weitere Bezüge zu definieren, sollte dies anhand der vorgestellten Kriterien geschehen. Sinnvolle Bezüge stellen hier beispielsweise Flanschflächen dar, die beim Fügen der Bauteile als Verbindungsfläche dienen. Nur so lässt sich eine möglichst abweichungsfreie Fügestelle realisieren. Zur Absicherung der Bezugsstellendefinition für zusätzliche benötigte Bezüge dient die Toleranzsimulation [Klei1].

*Bottom Up - Bezugsstellenvergabe:*

Diese Art der Bezugsstellenvergabe vererbt die Bezugsstellen der Einzelteile in die Baugruppe. Dabei ist die Übernahme aller Bezugsstellen des Einzelteils für den späteren nicht immer Zusammenbau. Deshalb ist die Selektion und anschließende Vererbung der stabilsten Bezugsstellen notwendig.

Zur Orientierung dienen die eingangs erwähnten Kriterien zur Definition von Bezugsstellen. Iterationen bei der Selektion der geeigneten Bezugsstellen sind gängig. Als Analysewerkzeug dient wiederum die Toleranzsimulation [Klei1].

Abbildung 2.45 zeigt die Bezugssysteme der Einzelteile einer Motorhaubenbaugruppe. Die durchgängigen Bezugsstellen sind dabei grün markiert.

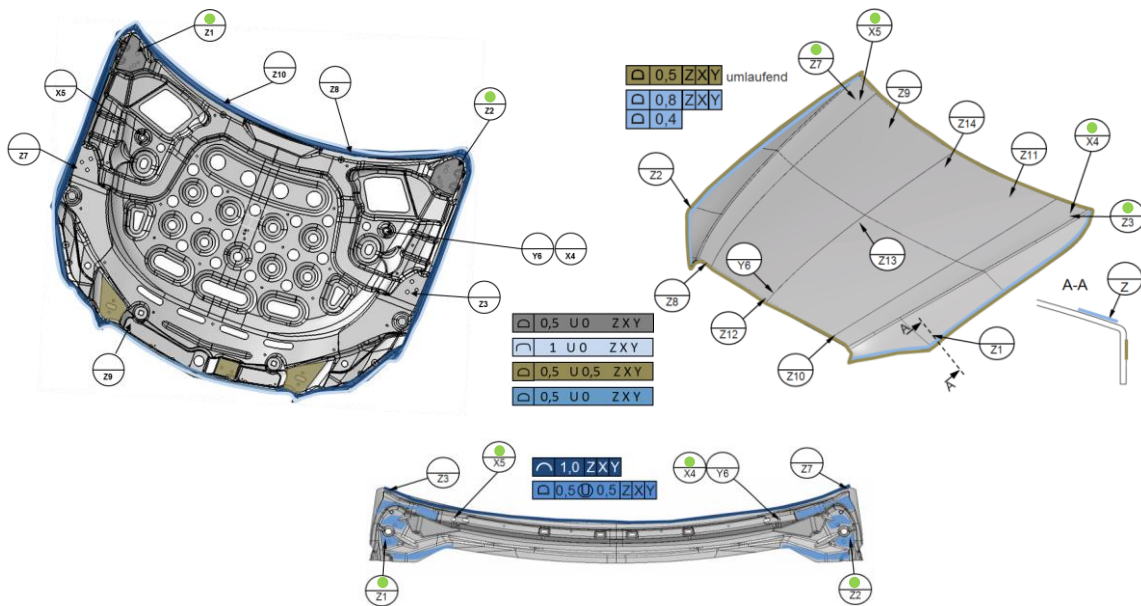


Abbildung 2.45 Durchgängiges Bezugssystem einer Motorhaubenbaugruppe

#### 2.3.3.4 Festlegen der maximal zulässigen Toleranzen

Bei der Tolerierung der Bauteile und Baugruppen ist zwischen Einzelteiltolerierung und Zusammenbautolerierung zu unterscheiden.

Zu tolerieren sind jene Flächen der Einzelteile, die bei der späteren Montage zur Baugruppe keinen durchgängigen Bezug haben (vgl. Kapitel 2.3.3.3) und deren Gestaltabweichungen genauer zu spezifizieren sind, als es in der entsprechenden Allgmeintoleranz festgelegt ist. Jedoch muss die Paarung dieser Flächen an mehreren Einzelteilen eine spätere Funktion des Zusammenbaus sicherstellen. Einzelteiltolerierungen bilden Vorgaben für den Herstellprozess der Bauteile (z. B. Pressteile), wogegen die Tolerierung des Zusammenbaus aus Gründen der Funktionserfüllung erfolgt. Aufgrund von Positionsstreuungen der Montageanlage während der Montage der Einzelteile müssen die Toleranzzonen der Einzelteile immer enger als die des Zusammenbaus gewählt werden [MBN 10273] [MBN 36012]. Die Abhängigkeit zwischen Einzelteiltolerierung und Zusammenbautolerierung ist beispielhaft in Abbildung 2.46 zu erkennen.

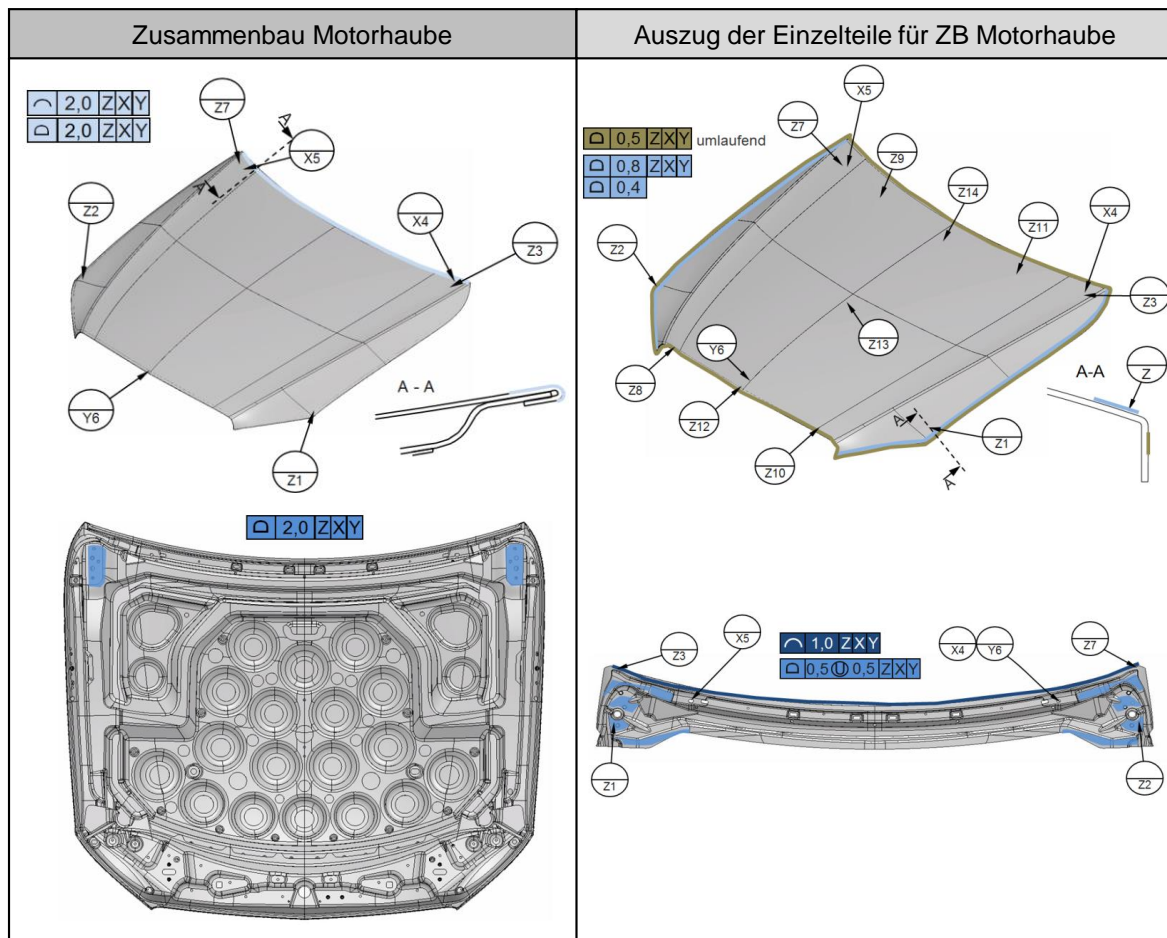


Abbildung 2.46 Vergleich zwischen Einzelteiltoleranzen und Zusammenbautoleranzen

Folgende Grundregeln sind nach [Bohn, Hets2] bei der Vergabe von Toleranzen einzuhalten:

- Tolerierung aller in der Wirkstruktur beschriebenen Funktionen
- Ableiten der Toleranzgrenzen (USL, LSL) aus der Funktion des Geometrieelements
- Wahl des Toleranzbands so eng wie nötig und so weit wie möglich
- Gewährleistung der mess- und prüfgerechte Tolerierung

Im Karosserierohbau werden vorzugsweise dünnwandige Blechbauteile verwendet. Funktionsgeometrien werden weitgehend aus Flächen, Freiformflächen, Stanzlöchern sowie Schweißschrauben und Stanzeinpressschrauben gebildet. Eine Zusammenstellung der möglichen Toleranzen entsprechender Geometrieelemente der Rohbauteile unter Berücksichtigung der dazugehörigen Allgmeintoleranzen zeigt Tabelle 2.1.



Tabelle 2.3 Auszug der gängigen Toleranzen im Karosserierohbau, sowie zugehörige Allgmeintoleranzen [MBN 36012] [MBN 10273]

	Symbol	MBN 36012 ET <sup>8</sup>	MBN 10273 Klasse 1	MBN 10273 Klasse 2	MBN 10273 Klasse 3
Bezugsstellen		-	-	-	-
Materialseite	→	-	-	-	-
Flächenformtoleranz allg.	□	1,0	1,0	1,5	3,0
Lochbilder, Position	⊕	1,0	1,0	1,5	2,0
Schweißschrauben /- muttern mit Bund	⊕	-	1,0	1,5	3,0
Schweißschrauben /- muttern ohne Bund	⊕	-	1,5	2,0	3,0
⋮					
Schweißbolzen	⊕	-	2,0	2,0	6,0
Beschnitt	⌒	-	2,0	3,0	4,0
Falzkanten	⌒	-	-	1,0	1,0
Positionstoleranz Fixierlöcher	⊕	0,4	-	-	-
Lochdurchmesser allg. bzw. Formkontur	∅	+0,2 -0,1	-	-	-
Durchmessertoleranz Fixierlöcher	∅	+/- 0,1	-	-	-

### 2.3.3.5 Analyse des Toleranzkonzepts

Am Ende soll das erarbeitete Toleranzkonzept einer kritischen Analyse unterzogen werden.

Nach [Bohn, Hets2] stehen zweierlei Arten der Analyse zur Verfügung:

- Analyse mithilfe von Toleranzrechnungen (vgl. dazu Kapitel 2.3.6):

Die Analyse mithilfe von Toleranzrechnungen findet vorwiegend in der Konzeptphase Anwendung. Ihr Vorteil liegt in der Möglichkeit, eine Vielzahl an Varianten mithilfe digitaler Prototypen abzubilden. So kann das bestmögliche Toleranzkonzept ausgewählt werden

- Analyse mithilfe von Hardware (Messungen):

Die Analyse der Modellbildung anhand real aufgebauter Produkte ist unabdingbar. So kann im Sinne des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses die Modellbildung sukzessive verfeinert werden. Dies ermöglicht im Nachfolgeprodukt oder Derivat eine noch bessere Vorhersagegenauigkeit.

Nach Analyse der funktionsorientierten Toleranzkonzepte werden diese mithilfe mehrerer Iterationen optimiert.

### 2.3.4 Organisationsformen des Toleranzmanagements

Zur Erarbeitung eines Toleranzkonzepts - mit dem Ziel einer räumlichen Integration aller Komponenten (nach VDI 2206) - sind über den Produktentwicklungsprozess viele Personen aus unterschiedlichsten Gewerken beteiligt. Aufgrund der notwendigen Moderation hat der Toleranzmanager zentrale Rolle inne. Seine Aufgabe ist es, Anforderungen aller Gewerke aufzunehmen, um damit eine kundenorientierte Lösung für das Gesamtprodukt zu erarbeiten. Die Schnittstellen, die ein Toleranzmanager beim Produktentwicklungsprozess zu berücksichtigen hat, zeigt Abbildung 2.47.



Abbildung 2.47 Schnittstellen eines Toleranzmanagers nach [Litw2], [Pors], [Lossn],

Dabei findet die Abstimmung mit den jeweils betroffenen Personen (vgl. Abbildung 2.47) in Toleranzarbeitskreisen statt. Unter einem Arbeitskreis versteht man hier ein interdisziplinäres Team, das das Produkt nach funktionalen Aspekten hin domänenübergreifend bearbeitet. Die modulare Aufteilung des Produktes resultiert aus dem Herunterbrechen der Anforderungen in Wirkstrukturen (vgl. VDI 2221). Eine solche modulare Aufteilung (Modulstrategie) sowie die Zusammensetzung des Toleranzarbeitskreises zeigt Abbildung 2.48

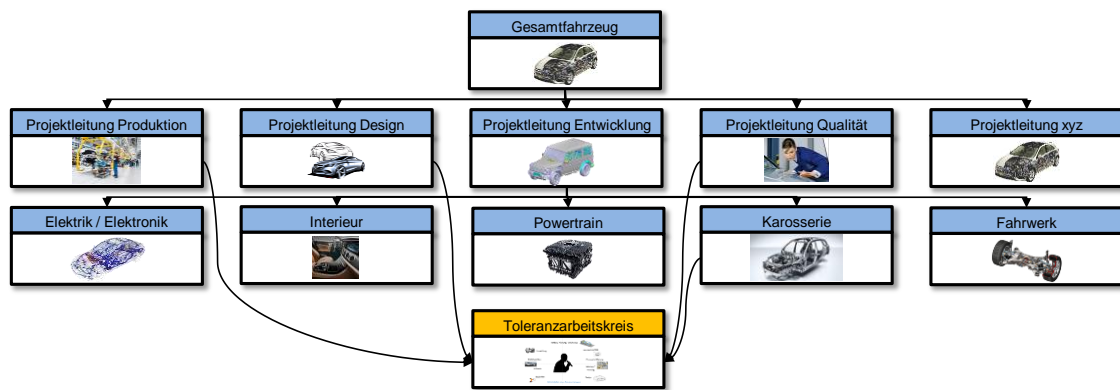


Abbildung 2.48 Modulstrategie und Zusammensetzung eines interdisziplinären Toleranzarbeitskreises

Nach [Bohn, Hets2] ist für den Erfolg des Arbeitskreises entscheidend, dass die Teilnehmer „das Mandat ihrer Bereiche haben und ihre Aussagen verbindlich sind, ansonsten sind Schleifen und Zeitverzögerungen die Folge“. Nicht immer werden für anstehende Themen sämtliche Teilnehmer des Arbeitskreises kontaktiert. Die lediglich bilaterale Abstimmungen mit direkt betroffenen Beteiligten ist in der Praxis durchaus gängig. Die Schnittstellenfunktion des Toleranzmanagers erfordert Entscheidungsbefugnis sowie die Möglichkeit zur Eskalation in höheren Gremien.

### 2.3.5 Aufgaben und Ergebnisse des Toleranzmanagements

Während der Entwicklung eines Produktes hat das Toleranzmanagement viele entscheidende Aufgaben die nachfolgend näher erläutert werden. Dabei wird auch auf die Ergebnisse, resultierend aus den zahlreichen Arbeiten, eingegangen. Aufgrund der Wiederkehr verschiedener Phasen im Fahrzeugentwicklungsprozess erfolgt eine iterative Abarbeitung der Aufgaben. Dies führt zu einer Detaillierung in den Ergebnissen. Abbildung 2.49 zeigt die wesentlichen wiederkehrenden Aufgaben eines Toleranzmanagers im Produktentwicklungsprozess.

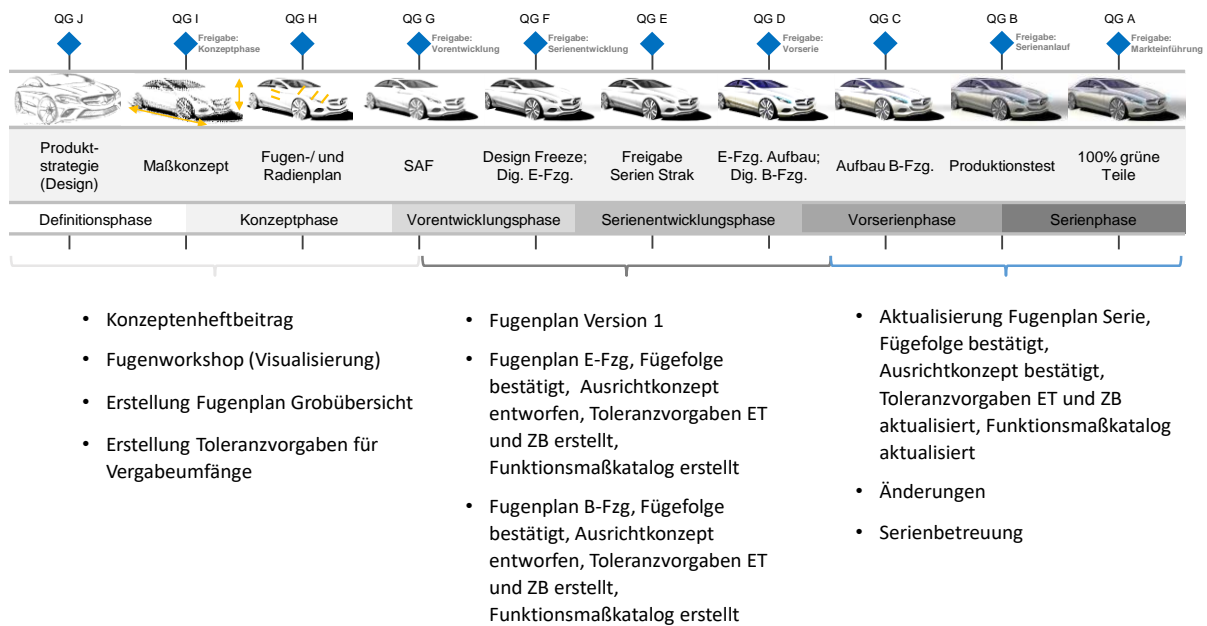


Abbildung 2.49 Aufgaben eines Toleranzmanagers im Produktentwicklungsprozess in Anlehnung an [Räse]

### 2.3.5.1 Fugen und Radianplan

Parallel zu den ersten Designentwürfen des neuen Produktes erfolgt durch das Toleranzmanagement die Erstellung des ersten Grobentwurfs des Fugen- und Radianplans. Dieser Plan beschreibt für definierte Schnittstellen die Fugen-, Radian- und Versatzmaße inklusive der maximal zulässigen Toleranzen (Wertebereich) und Auditmessschnitte am Fertigfahrzeug. Das Ziel ist es, eine eindeutige prüfbare Spezifikation der optischen Funktionsmaße des Fahrzeugs zu erhalten. Die Schnitte, an denen später ein Audit des Fugen- und Versatzmaßes erfolgt, werden in einer sehr frühen Phase im Produktentwicklungsprozess domänenübergreifend im Toleranzarbeitskreis abgestimmt und sind später maßgebend. Pro Schnitt erfolgt im ersten Schritt die Eintragung des nominalen Fugenmaßes / Versatzmaßes der entsprechenden Stelle sowie eine Angabe des Maßes im lackierten Zustand der Karosserie. Der Fugen- und Radianplan ist eine Vereinbarung zwischen den Bereichen Design, Entwicklung und Produktion. Schon in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses dient er als Entwicklungsvorgabe und später als Produktionsvorgabe [Litw2]. Abbildung 2.50 zeigt je einen Auszug aus dem Fugen- und Radianplan der frühen und späten Phase des Produktentwicklungsprozesses.

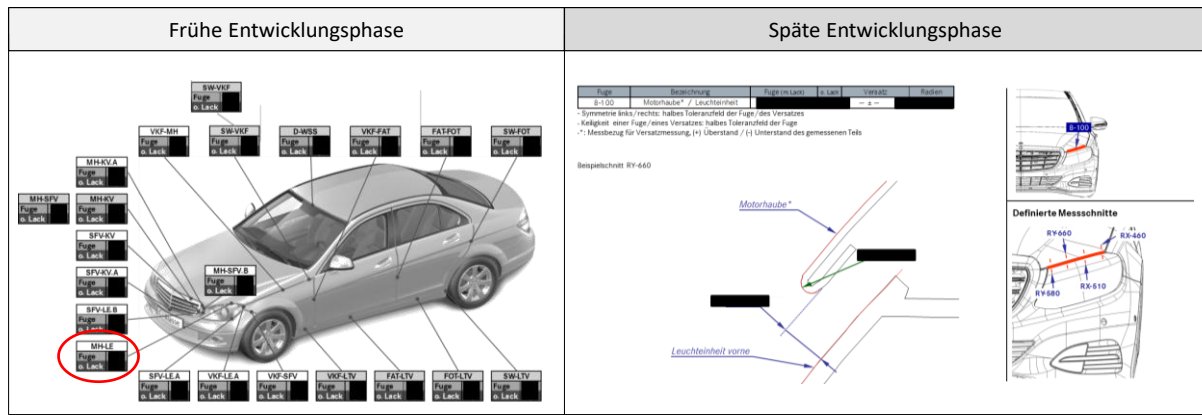


Abbildung 2.50 Entwicklung des Fugen- und Radienplans

### 2.3.5.2 Funktionsmaßkatalog

Ähnlich, wie der Fugen- und Radienplan für optische Funktionen, beschreibt der Funktionsmaßkatalog alle maßrelevanten technischen Funktionen des Produkts. Dabei ist auch hier neben dem reinen Nominalmaß der entsprechenden Funktion eine maximal zulässige Abweichung (Wertebereich) enthalten. Die Einhaltung der vorgegebenen zulässigen Abweichungen der technischen Funktionen des Produktes gewährleisten die Realisierbarkeit. Die Ausfertigung des Funktionsmaßkataloges beginnt mit der Erstellung der Funktionsstruktur des Fahrzeugs. Die Funktionsmaße der verschiedenen Aufbaustufen eines Karosserierohbaus werden im Messhaus durch das Audit geprüft. Abbildung 2.51 zeigt exemplarisch einen Auszug von Funktionsmaßen eines Karosserierohbaus.

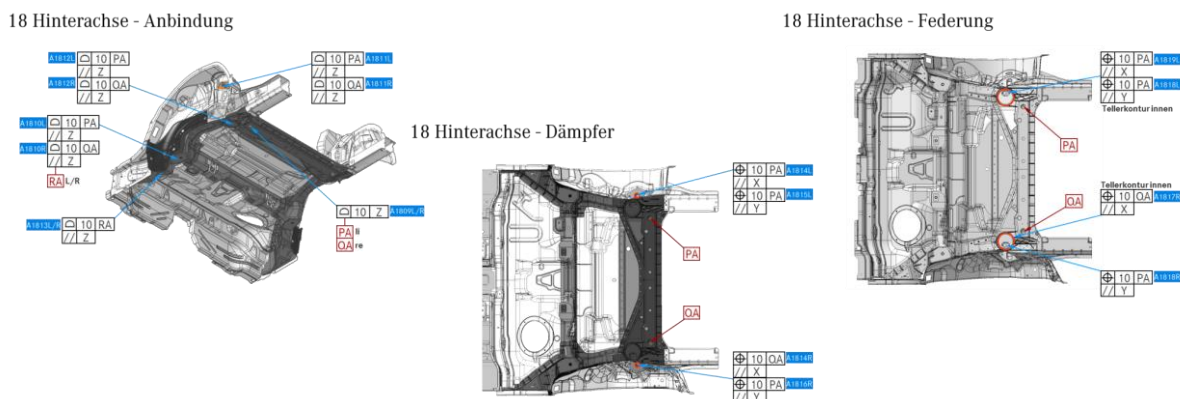


Abbildung 2.51 Funktionsmaße an einem Karosserierohbau

### 2.3.5.3 Ausricht- und Fügekonzepte

Das Ausrichtkonzept beschreibt, wie die Bauteile beim Fügen zueinander angeordnet und ausgerichtet werden. Dies berücksichtigt sowohl das Ausrichten der Bauteile und

Zusammenbauten zueinander als auch deren Ausrichtung in Fertigungs- und Fügeanlagen. Zur Erstellung des Ausricht- und Fügekonzeptes kommen situative Verfahren wie die Toleranzsimulation zum Einsatz, um die unterschiedlichen Ausrichtvarianten gegenüberzustellen [Litw2], [Pors]. Abbildung 2.52 zeigt ein Ausricht- und Fügekonzept am Beispiel eines PKW-Kotflügels.

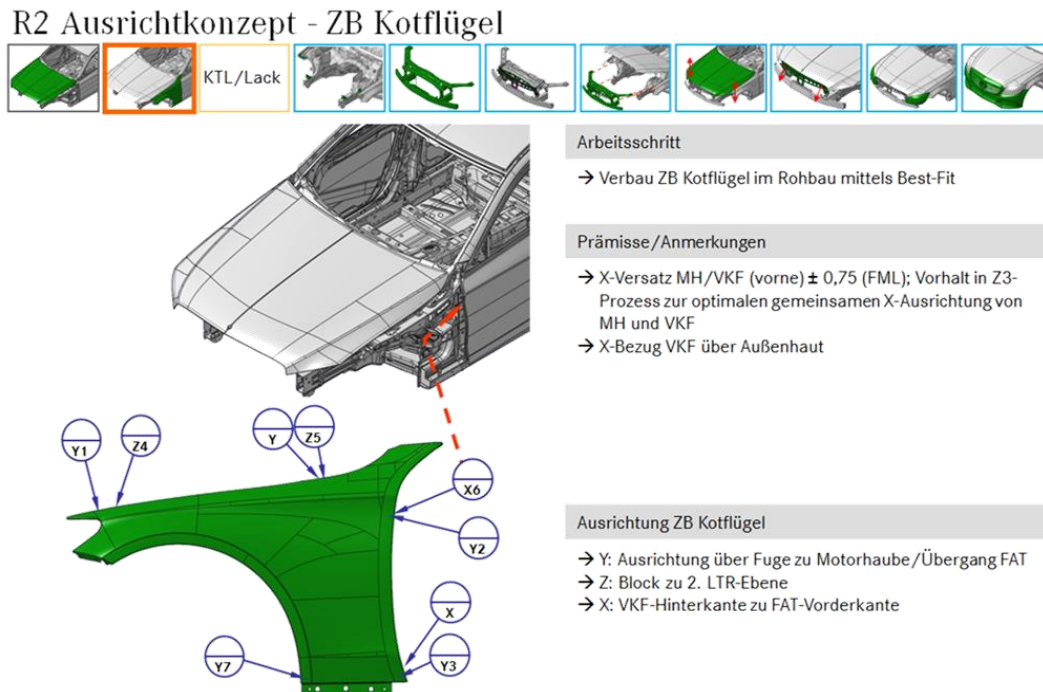


Abbildung 2.52 Ausricht- und Fügekonzept eines PKW-Kotflügels

#### 2.3.5.4 Toleranzkonzept für Einzelteile und Zusammenbauten

Ein Toleranzkonzept beschreibt funktionsorientiert die Toleranzen und Bezüge aus übergeordneten Funktionen bzw. Anforderungen. Dabei erfolgt unabhängig vom Materialkonzept die Herunterbrechung auf Einzelteile und Zusammenbauten. Siehe dazu auch die Abbildungen 2.45 und 2.46 in Kapitel 2.3.3. In jeder Entwicklungsphase ist die Abstimmung der Toleranzkonzepte mit allen Prozessbeteiligten in den Toleranzarbeitskreisen notwendig.

#### 2.3.5.5 Weiterführende Aufgaben

Neben den Hauptaufgaben innerhalb des Entwicklungsprozesses fallen für den Toleranzmanager noch weitere Arbeiten an. Die wesentlichen sind dabei:

- Abstimmung, Kooperation und Beratung von Lieferanten

- Verfolgung des Produktionsaufbaus und der Messauswertung (für Vorserien und Serienfahrzeuge)
- Rückführung von Daten aus der laufenden Serienfertigung zum Abgleich der Modellbildung
- Ableitung von Prüfkriterien
- Durchführen von simulativen Absicherungen (Toleranzsimulationen)
- Dokumentation der Arbeitsergebnisse

### **2.3.6 Grundlagen der Toleranzsimulation**

In diesem Kapitel werden Grundlagen des Simulationsprozesses, Begrifflichkeiten und Verfahren der Toleranzsimulation sowie die dabei angewandten Berechnungsverfahren erläutert.

#### **2.3.6.1 Der Simulationsprozess**

Ein Simulationsprozess ist nach [Bung, Zimm, Buch, Pflü] ein mehrstufiger, teilweise iterativer Prozess, der sich in sechs Stufen gliedert. Dieser als „Simulationspipeline“ bezeichnete Prozess wird hier detailliert erklärt.

Im ersten Schritt der Modellbildung erfolgt die Modellerstellung. Unter einem Modell ist nach [Bung, Zimm, Buch, Pflü] „eine vereinfachende formale Beschreibung eines geeigneten Ausschnitts des Betrachtungsgegenstands“ zu verstehen, welche das Fundament der anschließenden Analysen bildet.

Im darauffolgenden Schritt, der Berechnung / Simulation, erfolgt die Aufbereitung des Modelles, sodass es von einer Software verarbeitet werden kann. Dabei werden aus der kontinuierlichen Daten- und Informationsmenge relevante Teilmengen extrahiert. Zur Lösung des Modells sind entsprechende Algorithmen notwendig.

Bei der Implementierung erfolgt die Erstellung von Software in der Zielarchitektur zum Lösen des Modells mit den zuvor definierten Algorithmen. Dabei muss Rücksicht auf einen performanten Code sowie eine nutzerfreundliche Software genommen werden.

Im nächsten Schritt gilt es, die Ergebnisse aus dem erfolgreichen Simulationslaufs zu interpretieren und darzustellen (Visualisierung). Dabei ist auf eine verständliche Darstellung zu achten.

Bei der Validierung erfolgt beispielsweise anhand von Versuchen eine kritische Prüfung der Ergebnisse auf Plausibilität. Wurden Modellbildung, Algorithmenauswahl und Implementierung fehlerfrei durchgeführt, ist eine starke Korrelation mit Versuchsergebnissen zu erwarten. Falls dies nicht der Fall ist, müssen vorangegangene Schritte iteriert werden.

Zur erfolgreichen Anwendung der Simulation im Kontext der Produktentwicklung muss diese in vorhandene Systeme integriert werden (Einbettung). Dazu ist die Definition von Schnittstellen erforderlich. Zudem sind Software-Engineering und die Schaffung von Testumgebungen notwendig.

### **2.3.6.2 Begrifflichkeiten der Toleranzsimulation**

Bei der Modellbildung von Toleranzsimulationsmodellen kann grundsätzlich zwischen zwei Arten unterschieden werden: punktbasierte Modellbildung oder featurebasierte Modellbildung.

#### **Punktbasierte und featurebasierte Toleranzsimulationsmodelle**

Nach [Zhou, Vive, Mont, Morg] wird unter einer punktbasierten Toleranzsimulationsmethode die Nutzung von Punkten, beschrieben durch Koordinaten sowie einem Richtungsvektor (Wirkrichtung), und deren Verwendung in Verbindung mit Toleranzen, Zusammenbauoperationen sowie Messungen verstanden.

Unter der featurebasierten Toleranzsimulation ist nach [Zhou, Vive, Mont, Morg] eine direkte Nutzung von Features, abgeleitet aus Teilgeometrien des Bauteils zu verstehen. Dabei werden Toleranzen, Zusammenbauoperationen sowie Messungen auf Features - wie Flächen, zylindrische Stifte, Laschen, Löcher oder Langlöcher - gelegt.

Gründe für die verstärkte Nutzung von punktbasierter Modellierung im automobilen Umfeld (v. a. im Karosserierohbau) sind:

- Der Produktentwicklungsprozess im Rohbau fokussiert sich hauptsächlich auf Punkte wie (Spann- und Fixierpunkte, Verbindungstechnik, Bezugsstellen, Messpunkte etc.)
- Im Vergleich zur Gesamtgröße der Blechteile im Rohbau sind die gefügten Flanschbereiche in ihrem Abmaß vernachlässigbar klein, sodass eine punktförmige Approximation sinnvoll ist.



## Zusammenbauoperationen

Zur Abbildung der während der Produktion des Produktes vorkommenden Verbauoperationen stehen innerhalb der Toleranzsimulationssoftware unterschiedliche Arten an Fügемöglichkeiten bereit. Diese gliedern sich in starre Verbauoperationen mit statischer Bestimmtheit und elastische Verbauoperationen mit statischer Überbestimmtheit, wobei letztere eine Kopplung mit FEM-Systemen erfordern [Stoc], [Liu, Hu].

Statisch bestimmte Verbauoperationen kommen vorwiegend bei ideal starren Bauteilen mit kaum auftretenden Verformungen zum Einsatz. Jedoch können sie auch bei großflächig elastischen Bauteilen, wie sie im Karosserierohbau auftreten, Anwendung finden. Bei der Modellbildung müssen dabei Grundregeln eingehalten werden:

- Der Verbau von Bauteilen muss in Primärrichtung auf netzparallelen Flächen mit gleicher Wirkrichtung stattfinden.
- Auf möglichst große Entfernungen zwischen den Bezugsstellen der primären / sekundären Ausrichtung ist zu achten.
- Der Verbau der sekundären und tertiären Elemente soll auf koordinatenparallelen Bezugsebenen und Bezugsstellen stattfinden.
- Messpunkte müssen an Orte gesetzt werden, an denen keine allzu große Verformung des Bauteiles aufgrund fehlender Aufnahmen (bedingt durch die statisch bestimmte Modellbildung) zu erwarten ist.

Speziell gibt es beim Aufbau von Toleranzsimulationen im Karosserierohbau zwei typische Montageoperationen, welche die Prozesse der Rohbaumontageanlage hinreichend genau abbilden.

Beim Step-Plane-Move erfolgt die Definition von drei Zusammenbauorientungen, die den Primär-, Sekundär- und Tertiärausrichtungen entsprechen. Im Six-Plane-Move wird für jedes Punktepaar (Objektpunkt und Zielpunkt) eine Zusammenbauorientung festgelegt, sodass es sechs verschiedene Verbaorientungen gibt. Diese müssen jedoch im weitesten Sinne orthogonal zueinander stehen. [DCS]

## Messung von Funktionsmaßen in der Toleranzsimulation

Die verschiedenen Arten an Funktionsmaßen (technisch, optisch) müssen über den gesamten Produktentstehungsprozess einen prüfbaren Charakter aufweisen. Deshalb werden eindeutige Mess- und Antaststrategien genutzt (vgl. Kapitel 2.2.7). Diese können auch durch

die Messfeatures innerhalb der Toleranzsimulation abgebildet werden. Dabei stehen die folgenden Messfeatures zur Verfügung:

- Punkt - Abstandsmessungen
- Linien - Winkelmessungen
- Flächen - Winkelmessungen
- Sondermessungen

Beim punktbasierten Aufbau von Toleranzsimulationen im Karosserierohbau können die technischen und optischen Funktionsmaße durch nachfolgende Messungen genügend genau abgebildet werden.

Punkt zu Punkt Messung:

Bei der Punkt-zu-Punkt-Messung erfolgt die Ermittlung des Messwertes anhand der Relativposition der beiden Messpunkte. Dabei müssen zwei Punkte sowie die Art der Richtungszuweisung (Realabstand berechnet aus X, Y, Z- Anteilen, Projektion entlang einer vorgegebenen Vektorrichtung, Projektion auf eine Fläche) gegeben werden. Ein Großteil der Fugen- und Radienmaße lässt sich über dieses Messfeature darstellen.

Punkt - Nominal Messung:

Bei der Punkt-Nominal-Messung wird der Abstand des streuenden Punktes zu seiner Nominallage (CAD-Nulllage) ermittelt. Bei diesem Feature ist neben der Angabe des Messpunkts auch analog zur Punkt-zu-Punkt-Messung die Definition der Richtungszuweisung (Realabweichung entlang eines Vektors, entlang einer vorgegebenen Ebene) notwendig. Mithilfe dieser Messung lässt sich der Großteil der technischen Funktionsmaße am Fahrzeug abbilden.

### **2.3.6.3 Notwendige Informationen zur Toleranzsimulation im Produktentwicklungsprozess**

Zum Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen sind viele Informationen notwendig. Diese werden nachfolgend beschrieben.

Zentraler Bestandteil jeder Toleranzsimulation ist der Fügegraph. Dieser beschreibt die Reihenfolge, in der Bauteile und Baugruppen miteinander in der Produktionsanlage in Verbindung gebracht werden. Neben der reinen Baustruktur sind für jede der verbauten Bauteile und Baugruppen weitere Informationen erforderlich:

- Ausrichtung in der jeweiligen Verbaustation
- zulässige Abweichung der Bauteile / Baugruppen (Toleranzinformation)
- Positionen, an denen der Verbau erfolgt

Hieraus können beim Aufbau der Simulation die Montageoperationen erstellt werden. Zum Schließen der Maßkette ist auch das Qualitätsmerkmal (Funktionsmaß) der Simulation erforderlich. Dieses wird anhand von Messpunkten und der darauf aufbauenden Definition des Messfeatures im Simulationsmodell hinterlegt. Folgende Toleranzsimulationsarten über den Produktentstehungsprozess sind gängig. [Zhou, Vive, Mont, Morg]

In frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses kommen sogenannte Produktdesign-Simulationen zum Einsatz. Die erarbeiteten Lösungsprinzipien der Teilfunktionen müssen dabei auch im toleranzbehafteten Zustand die funktionalen Anforderungen erfüllen. Voll auskonstruierte Geometrien liegen hier oftmals noch nicht vor, sodass bei der Modellbildung punktbasierte Ersatzmodelle Anwendung finden. Dazu werden unterschiedliche Lösungsvarianten simulativ aufgebaut, berechnet und gegenübergestellt. Eine solche Variantenstudie hilft bei der Auswahl des richtigen Lösungskonzepts. Gerade bei Neukonzepten ist diese Art der Simulation für die reibungslose Systemintegration notwendig (vgl. Kapitel 2.1.2.2).

In der Produktanalyse-Simulation erfolgt der Nachweis der Funktionserfüllung der erarbeiteten Lösung anhand des digitalen Prototypens. Dazu werden beim Simulationsaufbau die vorliegenden Informationen (z. B. nach P-Freigabe) genutzt. Diese Art der Toleranzsimulation wird vorwiegend bei Konzeptübernahmen genutzt.

Die Produktherstellungs-Simulationen findet v. a. während der Produktherstellung (Prototypenbau, Anlauf, Serienproduktion) Anwendung. Die Identifikation von Haupteinflussfaktoren unerwarteter Abweichungen ist hier entscheidend. Die Modellbildung der Produktdesign-Simulation bzw. der Produktanalyse-Simulation ist dabei kritisch zu hinterfragen. Möglicherweise fanden hier wesentliche Beitragsleister der Maßkette keine Berücksichtigung.

#### **2.3.6.4 Berechnungsverfahren der Toleranzsimulation**

Nachdem der Aufbau der Toleranzsimulationsmodelle erfolgt ist, kann mithilfe der intern hinterlegten Algorithmen dieses berechnet werden. Folgende wesentliche Algorithmen stehen zur Berechnung bereit.

##### **Das Monte-Carlo Verfahren**

Eines der gängigsten Verfahren der Toleranzanalyse ist die sog. Monte-Carlo Methode. Dabei werden für die tolerierten Einzelteile  $n$  Zufallszahlen generiert. Diese Zufallszahlen „streuen“ jeweils im Bereich der vergebenen Toleranzen; je nach gewählter Verteilung der tolerierten Geometrieparameter der Einzelteile. Im Anschluss daran werden aus den  $n$  Einzelteilen  $n$  Baugruppen gebildet. Über die Funktion der Maßkette lässt sich somit das Schließmaß aller  $n$  Baugruppen berechnen und die entsprechende Schließmaßverteilung erzeugen. Ist die Anzahl  $n$  der simulierten Baugruppe ausreichend hoch, so kann angenommen werden, dass die Stichprobe repräsentativ für die Grundgesamtheit aller später hergestellten Baugruppen ist. Basierend auf der dann vorliegenden Verteilung erfolgt die Berechnung der Streuung des Funktionsmaßes.

##### **Die HLM-Analyse**

Über eine HLM-Simulation wird jeweils der Median, Maximal- oder Minimalwert einer Toleranz gesetzt. Alle anderen Toleranzen verbleiben auf ihrem Medianwert. Daraus errechnet die Software mithilfe der Formel 2.2 den Anteil jeder Einzeltoleranz an der Schließmaßverteilung. Bedingt durch die Variation nur einer Toleranz spricht man hier auch von einer lokalen Sensitivitätsanalyse.

## **2.4 Optimierung**

Im nachfolgenden Kapitel werden die Grundlagen und Begrifflichkeiten zur Optimierung sowie von Sensitivitätsanalysen erläutert. Ferner werden die Anforderungen einer Optimierung definiert. Außerdem werden der Stand der Technik im Bereich der Optimierung sowie dazugehörige Strategien und Methoden beleuchtet. Abschließend erfolgt eine Darlegung der Optimierung im Kontext des Toleranzmanagements.

## 2.4.1 Grundlagen und Begrifflichkeiten der Optimierung

Grundsätzlich wird nach [www07] unter einem Optimum ein „unter gegebenen Voraussetzungen, im Hinblick auf ein Ziel, höchstes erreichbares Maß bzw. höchster erreichbarer Wert“ verstanden. Dabei ist die Güte einer Optimierung abhängig von der Güte der Modellbildung. Je besser das abstrahierte Modell der Realität entspricht, desto exakter treffen die Optimierungsergebnisse das mathematische Optimum. Oftmals finden Optimierungen Anwendung auf mathematische Modelle, wobei eine Bestimmung von Modellparametern und Modellfunktionen erfolgt. Dazu werden Zielfunktionen unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen minimiert (eine einfache Transformation des Minimierungsproblems liefert das Maximum [Gerd]). Diese Kapitel dienen dazu, ein Grundverständnis zum Thema Optimierung zu schaffen.

### 2.4.1.1 Mathematische Definition und Anforderungen einer Optimierung

#### Formalisierung eines Optimierungsproblems

Das restringierte Standard-Optimierungsproblem wird nach [Gerd] folgendermaßen formuliert:

*Finde  $x \in \mathbb{R}^n$ , so dass  $f(x)$  minimal wird bei Berücksichtigung der Nebenbedingungen:*

$$g_i(x) \leq 0, i = 1 \dots m \quad (2.10)$$

$$h_j(x) = 0, j = 1 \dots p \quad (2.11)$$

Oftmals ist in der Literatur auch die folgende Kurzform des oben beschriebenen Optimierungsproblems zu finden:

$$\text{Minimiere } f(x) \quad \text{u. d. N.} \quad g(x) \leq 0, h(x) = 0 \quad (2.13)$$

Die zulässige Menge (der zulässige Bereich) definiert sich anhand der Nebenbedingungen nach [Gerd] mit:

$$\Sigma := \{x \in \mathbb{R}^n \mid g_i(x) \leq 0, i = 1 \dots m, j = 1 \dots p\} \quad (2.14)$$

Liegt bei den Nebenbedingungen  $g_i$  und  $h_j$  eine stetige<sup>7</sup> Funktion vor, so ist die zulässige Menge<sup>8</sup> abgeschlossen. Weiterhin erfolgt eine Unterscheidung nach zulässigen und unzulässigen Punkten  $x \in \mathbb{R}^n$ . Für einen zulässigen Punkt gilt  $x \in \Sigma$ ; andernfalls liegt ein unzulässiger Punkt vor. Durch zulässige Punkte wird die Indexmenge  $\mathcal{M}$  (Formel 2.15) der (in  $x$ ) aktiven Ungleichungsrestriktionen gebildet, wobei die Restriktion  $g_i(x) \leq 0$  entweder aktiv in  $x$  ( $g_i(x) = 0$ ) oder inaktiv in  $x$  ( $g_i(x) < 0$ ) ist. [Gerd]

$$\mathcal{M}(x) := \{i \in \{1 \dots m\} \mid g_i(x) = 0\} \quad (2.15)$$

Eine Unterteilung der Restriktionen in die drei Kategorien ist nach [Schu] gängig:

- $g_i(x) \leq 0$  mit  $i = 1 \dots m$  Ungleichheitsrestriktionen
- $h_j(x) = 0$  mit  $j = 1 \dots p$  Gleichheitsrestriktionen
- $x_j^l \leq x \leq x_j^u$  mit  $j = 1 \dots n$  explizite Restriktion

Weiterhin können Standard-Optimierungsprobleme nach [Gerd] in Spezialfälle gegliedert werden:

- *Unrestringiertes Optimierungsproblem:*

$$\text{Minimiere } f(x) \quad \text{u. d. N.} \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (2.16)$$

Hier liegen keine Ungleichungs- und Gleichungsrestriktionen der Form  $g(x) \leq 0$  oder  $h(x) = 0$  vor.

- *Konvexes Optimierungsproblem:*

$$\text{Minimiere } f(x) \quad \text{u. d. N.} \quad g(x) \leq 0. \quad Ax = b \quad (2.17)$$

Sowohl die Zielfunktion  $f(x)$  als auch die Ungleichheitsrestriktion  $g(x)$  werden durch konvexe Funktionen<sup>9</sup> gebildet, wobei  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$  eine Matrix und  $b \in \mathbb{R}^m$  ein Vektor sind. Der wesentliche Vorteil an der konvexen Optimierung ist, dass jedes der lokalen Minima auch gleichzeitig das globale Minimum darstellt [Schu].

- *Lineares Optimierungsproblem (in primaler Normalform):*

<sup>7</sup> „Eine Funktion  $y = f(x)$  heißt an der Stelle  $x = a$  stetig, wenn  $f(x)$  an der Stelle  $a$  definiert ist und der Grenzwert  $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$  existiert und gleich  $f(a)$  ist.“ [Bron]

<sup>8</sup> „Eine Teilmenge  $F$  eines metrischen Raumes  $X$  heißt abgeschlossen, wenn  $X \setminus F$  eine offene Menge ist.“ [Bron]

<sup>9</sup> Eine Funktion  $y = f(x)$  heißt konvex, wenn die Strecke zwischen zwei Verbindungspunkten oberhalb des Graphen liegt. [Bron]

$$\text{Minimiere } c^T x \quad \text{u. d. N.} \quad Ax = b. \quad x \geq 0 \quad (2.18)$$

Hier wird die Zielfunktion in der folgenden Form dargestellt,  $f(x) = c^T x$  und die Nebenbedingungen mit  $g(x) = -x$ ,  $h(x) = Ax - b$  oder  $h(x) = b - Ax$ , wobei  $c \in \mathbb{R}^n$ ,  $b \in \mathbb{R}^m$  Vektoren und  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$  eine Matrix bilden. Das lineare Optimierungsproblem stellt gleichzeitig ein konvexes Optimierungsproblem dar.

- *Linear-quadratisches Optimierungsproblem:*

$$\text{Minimiere } \frac{1}{2} x^T Q x + c^T x \quad \text{u. d. N.} \quad Ax = b. \quad x \geq 0 \quad (2.19)$$

Hier wird die Zielfunktion in der folgenden Form dargestellt  $f(x) = \frac{1}{2} x^T Q x + c^T x$  und die Nebenbedingungen mit  $g(x) = -x$ ,  $h(x) = Ax - b$  oder  $h(x) = b - Ax$ , wobei  $c \in \mathbb{R}^n$ ,  $b \in \mathbb{R}^m$  Vektoren und  $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$  sowie  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$  wiederum eine Matrix bilden. Ist die Matrix  $Q$  symmetrisch und positiv semidefinit<sup>10</sup>, liegt ein konvexes Optimierungsproblem vor.

### Notwendige und hinreichende Bedingung für restringente Optimierungsprobleme

Als Basis für zahlreiche theoretische Untersuchungen sowie numerische Algorithmen wird die sog. *Karush-Kuhn-Tucker* (KKT) Bedingung herangezogen. Zur Untersuchung selbiger sind Kenntnisse über die *Lagrange-Funktion* für das Standard-Optimierungsproblem nötig. Diese Funktion ist definiert durch:

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) + \lambda^T g(x) + \mu^T h(x) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) + \sum_{j=1}^p \mu_j h_j(x) \quad (2.20)$$

dabei werden  $\lambda = (\lambda_1 \dots \lambda_m)^T \in \mathbb{R}^m$  und  $\mu = (\mu_1 \dots \mu_p)^T \in \mathbb{R}^p$  als *Lagrange-Multiplikatoren* bezeichnet [Gerd]. Die Lagrange-Funktion enthält die Information über die Zielfunktion sowie über vorhandenen Restriktionen.

In der Mathematik erfolgt eine Unterscheidung zwischen zwei Arten von Bedingungen. Notwendige Bedingungen werden von einem lokalen Minimum immer erfüllt. Die hinreichenden Bedingungen dienen der Entscheidung, ob ein lokales Minimum vorliegt oder nicht. [Gerd].

Für eine *notwendige Bedingung erster Ordnung* (KKT-Bedingung) wird nach [Gerd] folgendes vorausgesetzt:

<sup>10</sup> Falls alle Eigenwerte der Matrix  $Q \geq 0$  sind, handelt es sich um eine positiv semidefinite Matrix. [Bron]

- $\hat{x}$  sei ein lokales Minimum des Standard-Optimierungsproblems,
- Funktionen  $f, g_i, i = 1 \dots m$ , und  $h_j, j = 1 \dots p$ , sind stetig differenzierbar<sup>11</sup>,
- es gilt *Linear Independence Constraint Qualification* in  $\hat{x}$ , d.h. die Vektoren  $\nabla g_i(\hat{x}), i \in \mathcal{M}(\hat{x})$  und  $\nabla h_j(\hat{x}), j = 1 \dots p$ , sind linear unabhängig<sup>12</sup>.

Sind diese Voraussetzungen erfüllt, existieren bestimmte Multiplikatoren  $\lambda = (\lambda_1 \dots \lambda_m)^T \in \mathbb{R}^m$  und  $\mu = (\mu_1 \dots \mu_p)^T \in \mathbb{R}^p$ , so dass die folgenden drei Bedingungen gelten [Gerd]:

1) *Stationarität der Lagrange-Funktion:*

$$\nabla_x L(\hat{x}, \lambda, \mu) = \nabla f(\hat{x}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(\hat{x}) + \sum_{j=1}^p \mu_j \nabla h_j(\hat{x}) = 0 \quad (2.21)$$

2) *Komplementaritätsbedingungen:* Für  $i = 1 \dots m$  gilt

$$\lambda_i \geq 0 \quad \text{und} \quad \lambda_i g_i(\hat{x}) = 0 \quad (2.22)$$

3) *Zulässigkeit:*

$$g(\hat{x}) \leq 0 \quad \text{und} \quad h(\hat{x}) = 0 \quad (2.23)$$

Erfüllt ein Punkt  $(\hat{x}, \lambda, \mu)$  die genannten Bedingungen, so kann es sich bei diesem Punkt um ein lokales Minimum handeln. Oft spricht man bei diesen Punkten von stationären- oder *Karush-Kuhn-Tucker*-Punkten. Diese Punkte sind mögliche Stellen für ein Optimum.

Zur Veranschaulichung wird nachfolgend ein gleichungsrestringiertes Optimierungsproblem herangezogen und damit die *Karush-Kuhn-Tucker*-Bedingung nach [Gerd] veranschaulicht (siehe Abbildung 2.53).

<sup>11</sup> Eine Funktion  $y = f(x)$  heißt stetig differenzierbar, wenn die Funktion  $f(x)$  differenzierbar (Existenz der Ableitung für die Werte der Variablen  $x$  ist gegeben) und ihre Ableitung stetig ist. [Bron]

<sup>12</sup> „Sei  $V$  ein  $K$ -Vektorraum. Die Vektoren  $v_1, v_2, \dots, v_m \in V$  heißen *linear abhängig*, falls es  $k_1, k_2, \dots, k_m \in K$  gibt, die nicht alle gleich Null sind, so dass  $0 = k_1 v_1 + k_2 v_2 + \dots + k_m v_m$  gilt. Anderenfalls sind sie *linear unabhängig*.“ [Bron]



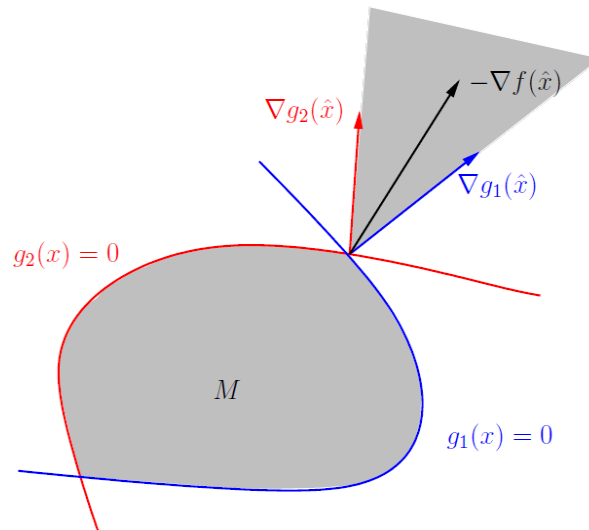


Abbildung 2.53 Graphische Darstellung der KKT-Bedingung für ein gleichungsrestringiertes Optimierungsproblem nach [Gerd]

Der negative Gradient der zu minimierenden Funktion  $-\nabla f(\hat{x})$  kann als nicht-negative Linearkombination der Gradienten der aktiven Restriktionen in einem lokalen Minimum  $\hat{x}$  dargestellt werden. Somit muss der negative Gradient in dem durch die (linear unabhängigen) Gradienten  $\nabla g_1(\hat{x})$  und  $\nabla g_2(\hat{x})$  aufgespannten Kegel liegen. [Gerd]

Für die Spezialfälle aus Gleichung (2.16, 2.17, 2.18 und 2.19) kann die erste notwendige Bedingung nach [Gerd] folgendermaßen vereinfacht werden:

- Notwendige Bedingung für ein unrestringiertes Optimierungsproblem:

$$\nabla f(\hat{x}) = 0 \quad (2.24)$$

- Lagrange-Funktion für ein lineares Optimierungsproblem (in primaler Normalform):

$$L(x, \lambda, \mu) = c^T x + \lambda^T (-x) + \mu^T (b - Ax) \quad (2.25)$$

Dabei bildet die notwendige Bedingung die nachfolgende Form

$$c - \lambda - A^T \mu = 0 \quad \lambda \geq 0 \quad \lambda^T (-\hat{x}) = 0 \quad (2.26)$$

bzw.

$$A^T \mu \leq c \quad \hat{x}(c - A^T \mu) = 0 \quad (2.27)$$

- Bei linear-quadratischen Optimierungsproblemen sieht die Lagrange-Funktion folgendermaßen aus:

$$L(x, \lambda, \mu) = \frac{1}{2} x^T Q x + c^T x + \lambda^T (-x) + \mu^T (b - Ax) \quad (2.28)$$

mit der notwendigen Bedingung:

$$Q\hat{x} + c - \lambda - A^T\mu = 0 \quad \lambda \geq 0, \quad \lambda^T(-\hat{x}) = 0 \quad (2.29)$$

Bei einem unrestringierten Optimierungsproblem ist die notwendige Bedingung erster Ordnung einfach darzustellen. Demnach muss der Gradient aus Gleichung 2.24 gleich Null sein. Damit liegt an diesem Punkt keine Steigung vor. In Abbildung 2.54 ist eine Funktion dargestellt, bei der die Länge der Pfeile den Betrag des Gradienten darstellen. Demnach liegt in zwei Bereichen (Randbereich und Zentrum) keine Steigung vor, wonach es sich hier um mögliche Optima handelt.

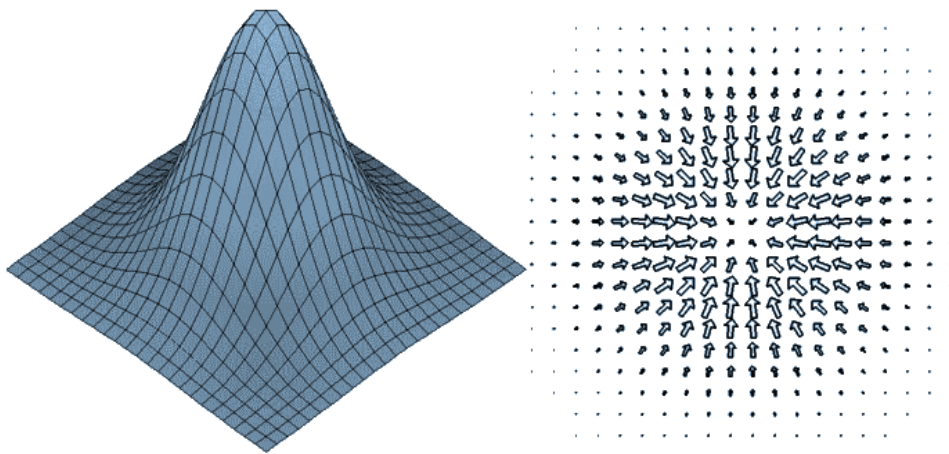


Abbildung 2.54 Exemplarischer Gradientenverlauf bei einer Funktion mit einem Maximum

Mithilfe der ersten notwendigen Bedingung lassen sich nur stationäre Punkte bestimmen. Damit ist eine Aussage über das lokale Verhalten der zu minimierenden Funktion  $f(x)$  nicht möglich. Um diese Aussage geben zu können, ist die Prüfung der notwendigen Bedingung zur zweiten Ordnung unumgänglich. Erst damit kann sichergestellt werden, dass es sich um ein lokales Optimum handelt. Nach [Gerd] ist ein kritischer Kegel zu definieren:

$$\begin{aligned} T_K(x) := \{d \in \mathbb{R}^n \mid \nabla g_i(x)^T d \leq 0, \quad i \in \mathcal{M}(x), \quad \hat{\lambda}_i = 0, \\ \nabla g_i(x)^T d = 0, \quad i \in \mathcal{M}(x), \quad \hat{\lambda}_i > 0, \\ \nabla h_j(x)^T d = 0, \quad j = 1 \dots p\} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Die Betrachtung des kritischen Kegels ist aus folgenden Grund nötig. Falls  $d \in T_K(\hat{x})$  ist, so liefern die KKT-Bedingungen den Ausdruck:

$$0 = \nabla f(\hat{x})^T d + \sum_{i \in \mathcal{M}(\hat{x})} \lambda_i \nabla g_i(\hat{x})^T d + \sum_{j=1}^p \mu_j \nabla h_j(\hat{x})^T d \quad (2.31)$$

Da  $d \in T_K(\hat{x})$  ist, nehmen die beiden letzten Stellen des Ausdrucks den Wert Null an und es bleibt:

$$0 = \nabla f(\hat{x})^T \quad (2.32)$$

Damit ist die Richtungsableitung für alle kritischen Richtungen  $d \in T_K(\hat{x})$  gleich Null. In diesem Fall kann keine Aussage über das Verhalten der Zielfunktion  $f(x)$  getroffen werden. Dadurch wird eine weitere Zusatzanforderung notwendig, welche die Krümmung der Zielfunktion näher beschreibt.

Die notwendige Bedingung zweiter Ordnung setzt zusätzlich zur Bedingung der ersten Ordnung folgendes voraus [Gerd]:

- $\hat{x}$  sei ein lokales Minimum des Standard-Optimierungsproblems,
- Funktionen  $f, g_i, i = 1 \dots m$ , und  $h_j, j = 1 \dots p$ , sind zweimal stetig differenzierbar,
- es gilt die *Linear Independence Constraint Qualification* in  $\hat{x}$ ,
- $(\hat{x}, \lambda, \mu)$  ist ein stationärer Punkt des Standard-Optimierungsproblems.

Sind diese vier Bedingungen erfüllt gilt:

$$d^T \nabla_{xx}^2 L(\hat{x}, \lambda, \mu) d \geq 0 \quad \forall d \in T_K(\hat{x}) \quad (2.33)$$

Der Ausdruck (2.31) liefert damit eine Aussage, ob die Hessematrix der Lagrange-Funktion positiv semidefinit auf dem kritischen Kegel ist. Somit bildet  $d$  notwendigerweise eine Abstiegsrichtung von  $f$  in  $\hat{x}$ . Trotz positiv semidefiniter Hessematrix kann es sich bei dem stationären Punkt um einen Sattelpunkt handeln. Um abschließend zu prüfen, ob es sich bei dem Karush-Kuhn-Tucker-Punkt um ein lokales Minimum handelt, erfolgt eine Prüfung nach der *hinreichenden Bedingung zweiter Ordnung*. Diese lautet nach [Gerd] folgendermaßen:

- Funktionen  $f, g_i, i = 1 \dots m$ , und  $h_j, j = 1 \dots p$ , sind zweimal stetig differenzierbar,
- $(\hat{x}, \lambda, \mu)$  ist ein stationärer Punkt des Standard-Optimierungsproblems,
- es gilt:

$$d^T \nabla_{xx}^2 L(\hat{x}, \lambda, \mu) d \geq 0 \quad \forall d \in T_K(\hat{x}), d \neq 0 \quad (2.34)$$

Sind diese Anforderungen gegeben, existiert eine Umgebung  $U$  und ein  $\alpha > 0$  mit:

$$f(x) \geq f(\hat{x}) + \alpha \|x - \hat{x}\|^2 \quad \forall x \in \Sigma \cap U \quad (2.35)$$

Demnach erfolgt ein Zuwachs der zu minimierenden Funktion  $f(x)$  lokal mindestens quadratisch und  $\hat{x}$  bildet ein lokales Minimum. Abbildung 2.55 zeigt eine Darstellung der

hinreichenden Bedingung zweiter Ordnung im zweidimensionalen Raum. Die Funktion  $f(\hat{x}) + \alpha \|x - \hat{x}\|^2$  bildet dabei eine untere Schranke der Zielfunktion  $f(x)$ .

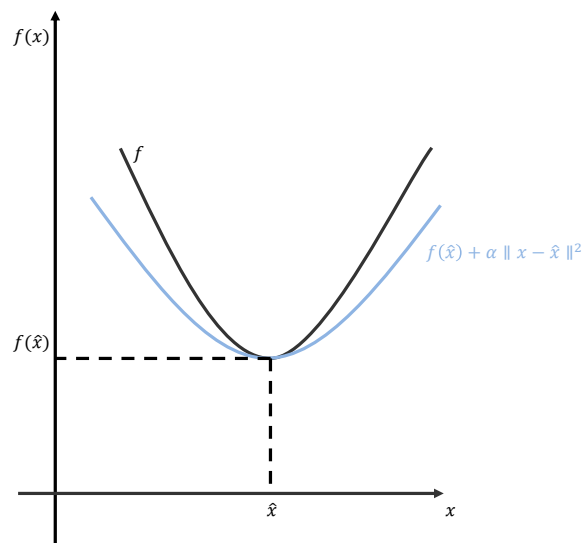


Abbildung 2.55 Graphische Darstellung der hinreichenden Bedingung zweiter Ordnung

### Globales und lokales Minimum

Neben lokalen und strikt lokalen Minima existieren globale und strikt globale Minima. Insbesondere in den Anwendungen mit vielen lokalen Minima ist das globale Optimum von Bedeutung. Im Folgenden werden die Unterschiede anhand der Definitionen verdeutlicht [Gerd2]

- $\hat{x} \in X$  heißt globales Minimum, falls  $f(\hat{x}) \leq f(x) \quad \forall x \in X$ .
- $\hat{x} \in X$  heißt striktes globales Minimum, falls  $f(\hat{x}) < f(x) \quad \forall x \in X, x \neq \hat{x}$ .
- $\hat{x} \in X$  heißt lokales Minimum, falls eine Umgebung

$$U_\varepsilon(\hat{x}) := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - \hat{x}\| < \varepsilon\} \quad (2.36)$$

existiert mit

$$f(\hat{x}) \leq f(x) \quad \forall x \in X \cap U_\varepsilon(\hat{x})$$

- $\hat{x} \in X$  heißt striktes lokales Minimum, falls eine Umgebung

$$U_\varepsilon(\hat{x}) := \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - \hat{x}\| < \varepsilon\} \quad (2.37)$$

existiert mit

$$f(\hat{x}) < f(x) \quad \forall x \in X \cap U_\varepsilon(\hat{x}), x \neq \hat{x}$$

Der Unterschied zwischen einem globalen und einem strikt globalen Minimum besteht darin, dass dem strikt globalen Minimum der kleinste Funktionswert in der Umgebung zugeordnet wird. Im Gegensatz dazu kann bei einem globalen Minimum der gleiche Funktionswert in einem gewissen Definitionsbereich vorliegen, d.h. die Steigung in diesem Bereich verläuft konstant. Globale Optima sind damit robuster und bleiben bei kleinen Änderungen der Funktionsparameter konstant. Abbildung 2.56 zeigt den Unterschied zwischen einem globalen und einem strikt globalen Minimum.

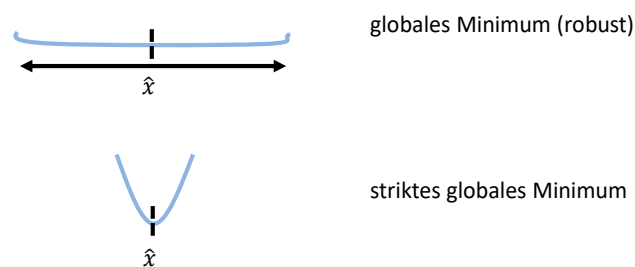


Abbildung 2.56 Unterschied zwischen globalem und strikt globalem Minimum

Gerade in der *Robust Design Optimierung* (RDO) wird versucht, globale Optima aufzufinden. In diesem Fall bleibt der minimal bzw. maximal erreichte Wert bei einer kleinen Änderung der Parameter konstant. Somit kann die Robustheit der Produkte gegenüber zufälligen Streuungen gewährleistet werden.

#### 2.4.1.2 Techniken, Strategien und Methoden

Zur numerischen Lösung eines Standard-Optimierungsproblems können unterschiedliche Verfahren angewendet werden. Allen gleich ist jedoch, dass nicht immer das globale Optimum erreicht wird. Allerdings liefern alle Optimierungsalgorithmen in der Regel eine Verbesserung des vorliegenden Entwurfs (Startdesign).

Grundsätzlich kann zwischen einem gradientenbasierten und einem heuristischen Optimierungsverfahren unterschieden werden. Nach [Dyna] sind gradientenbasierte Verfahren (z. B. das SQP-Verfahren) sehr effizient. Jedoch liefern sie häufig nur ein lokales Optimum. Außerdem können komplexe Optimierungsprobleme diskrete Variable enthalten oder nicht die notwendigen Differenzierbarkeitseigenschaften aufweisen. Deshalb greift man in der Praxis oft auf heuristische Verfahren zurück (z. B. das Verfahren von Nelder und Mead oder auf naturanaloge Optimierungsverfahren). Vorteil dieser Verfahren ist, dass sie lediglich die Funktionswerte und keine Ableitungsinformationen der Zielfunktion benötigen. Bedingt

durch die Tatsache, dass es für heuristische Optimierungsverfahren keine Konvergenztheorie gibt, ist es nicht möglich, eine Aussage zu treffen, ob es sich bei dem gefundenen Punkt um ein lokales oder globales Minimum handelt. Trotz dieser Einschränkung werden in der Praxis sehr verlässliche Werte geliefert. [Gerd], [Dyna].

Da es kein allgemeines Verfahren für die Suche nach einem globalen Minimum gibt, müssen die Ergebnisse der Optimierung immer im Kontext des praktischen Problems analysiert werden. Nur so ist es möglich, eine fundierte Aussage zu treffen, ob ein Lösungskandidat gut genug für die jeweilige Anwendung ist. Die Auswahl des jeweiligen Verfahrens ist deshalb stark abhängig von der betreffenden Problemstellung. Weiterhin bieten heutige Optimierungsprogramme Kombinationen aus mehreren Algorithmen. Ein Beispiel dafür ist die Kombination eines heuristischen ( evolutionärer Algorithmus) mit einem gradientenbasierten Verfahren (NLPQL-Verfahren). Auf diese Weise wird zunächst mit Hilfe eines heuristischen Verfahrens ein Tal gesucht, welches auf ein globales Minimum hin untersucht wird. Nachfolgend werden die gängigsten Verfahren ausführlich erläutert.

### SQP-Verfahren

Das SQP-Verfahren ermöglicht eine Berechnung von nichtlinearen, restringierten Optimierungsproblemen und stellt eine Erweiterung des Lagrange-Newton-Verfahrens für gleichbeschränkte Probleme dar. Als Basis dient das Newtonverfahren, welches auf die KKT-Bedingungen angewendet wird. Dabei werden die iterierten Punkte durch die Auswertung der quadratischen Approximation der Lagrange-Funktion berechnet. Durch eine Tailorentwicklung der Lagrange-Funktion, welche wiederum die Zielfunktion sowie die Restriktionen des Standardoptimierungsproblems enthält, ergibt sich das folgende QP-Problem [Gerd]:

$$\begin{aligned} \min \frac{1}{2} d^T Q_k d + \nabla f(x^{[k]})^T d \text{ bzgl. } d \in \mathbb{R} \text{ u.d.N} \\ g(x^{[k]}) + g'(x^{[k]})d \leq 0 \\ h(x^{[k]}) + h'(x^{[k]})d = 0 \end{aligned} \quad (2.38)$$

Folgende Vorgehensweise ist nach [Gerd] zur Berechnung gängig:

- Es wird ein Startwert  $(x^{[0]}, \lambda^{[0]}, \mu^{[0]}) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p$  festgelegt mit dem Index  $k = 0$
- Erfüllt der Punkt  $(x^{[k]}, \lambda^{[k]}, \mu^{[k]})$  die KKT-Bedingungen des Standard-Optimierungsproblems, erfolgt der Abbruch des Algorithmus.
- Erfüllt der Punkt die KKT-Bedingung nicht, so erfolgt das Bestimmen eines anderen KKT-Punkts  $(d^{[k]}, \lambda^{[k+1]}, \mu^{[k+1]}) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p$  des quadratischen Optimierungsproblems QP, wobei  $d^{[k]}$  das quadratische Hilfsproblem löst.
- Anschließend wird  $x^{k+1} = x^k + d^k$  und  $k = k + 1$  gesetzt und es erfolgt die Bearbeitung des zweiten Punkts.

Die Konvergenz des SQP-Verfahrens kann an Orten in der Umgebung des lokalen Minimums mithilfe der lokalen Konvergenz bewiesen werden. Jedoch ist diese Umgebung in einem realen Optimierungsproblem nicht bekannt. Durch eine Globalisierung des SQP-Verfahrens lassen sich allerdings Konvergenzen für beliebige Startwerte ermitteln. Der iterierte Punkt ergibt sich demnach zu [Gerd]:

$$x^{[k+1]} = x^{[k]} + \alpha_k d^{[k]} \quad (2.39)$$

Zur Lösung des Hilfsproblems kann wiederum  $d^{[k]}$  verwendet werden. Eine eindimensionale Liniensuche in Richtung von  $d^{[k]}$  hilft bei der Ermittlung der Schrittweite  $\alpha_k$ . Es muss allerdings geprüft werden, ob der neue iterierte Wert  $x^{[k+1]}$  besser ist als der ursprüngliche  $x^{[k]}$ . Dies kann anhand des neuen Zielfunktionswertes gewichtet werden; was durch eine Bewertungsfunktion (engl. *merit function*) möglich ist. Im einfachsten Fall nutzt man die Idee der Penalty-Funktion. Dabei wird der Abstieg der Zielfunktion  $f$  analysiert. Der neu iterierte Wert ist besser als der alte, wenn ein hinreichender Abstieg erreicht wird. Weiterhin erfolgt eine Bewertung der Verletzung der Restriktionen. Schwache Verletzungen der Restriktionen sind dabei durchaus erwünscht, wobei darauf zu achten ist, dass sich einer der beiden Kriterien nicht wesentlich verschlechtert. Auf Basis des SQP-Verfahrens arbeiten einige Programme: Sie setzen dieses Verfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen, wie mechanische Strukturoptimierung oder Designoptimierung ein (z. B. NLPQL in Fortran [Schi]).

### **Adaptive Response Surface Method**

Adaptive Response Surface Method stellt eine weitere Möglichkeit der Optimierung dar. Hierbei geht man von einer globalen Approximation aus, die allerdings im gesamten Entwurfsraum gültig sein muss. Um dies zu gewährleisten, werden die sogenannten statischen

Versuchspläne (engl. *Design of Experiments, DOE*) erstellt, anhand derer die Koeffizienten der Approximationsfunktion zu bestimmen sind. Die Approximationsfunktionen bezeichnet man als *Meta-Modelle* oder *Response-Surface-Modelle* (RSM). Unter Verwendung von statischen Versuchspläne wird der Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen (unabhängige Variable) und Ausgangsgrößen (abhängige Variable) ermittelt. Zur Abtastung des gesamten Entwurfsraum gibt es unterschiedliche Methoden, die man im Allgemeinen in deterministische und zufällige Methoden unterteilt. Zu den zufälligen Methoden zählen beispielweise das *Monte-Carlo-Verfahren* oder des *Random Design* [Schu]. Bei den deterministischen Modellen sind *Factorial Design*, *Central Composit*, *D-Optimal Design* oder *Latin Hypercube* gängig [Dyna]. Die statischen Versuchspläne hängen außerdem von der aufgestellten Approximationsfunktion ab, die zur Beginn der globalen Approximation aufgestellt wird [Wang, Dong, Aitc]. Als Approximationsfunktion ist die folgende Form der Polynome geeignet [Schu]:

$$\tilde{f}(x) = c_0 + c_1 \frac{x_1 - x_1'}{x_1''} + c_2 \frac{x_2 - x_2'}{x_2''} + c_3 \left( \frac{x_2 - x_2'}{x_2''} \right)^2 + c_5 \left( \frac{x_1 - x_1'}{x_1''} \right) \left( \frac{x_2 - x_2'}{x_2''} \right) + \dots \quad (2.10)$$

Aufbauend auf dem Versuchsplan werden die Koeffizienten der Approximation mit Hilfe der Fehlerquadratrechnung (engl.: *Least-Square-Method*) [Schu] berechnet:

$$\min_{c_m} L = \sum_{i=1}^M (f_i - \tilde{f}_i)^2 \quad (2.41)$$

Dabei sind  $c_m$  die Koeffizienten der Approximationsfunktion,  $M$  die Anzahl der Stützstellen,  $f_i$  der Funktionswert und  $\tilde{f}_i$  der Funktionswerte aus dem Meta-Modell an der  $i$ -ten Stützstelle.

Das Approximationspolynom bei ARSM hat folgende quadratische Form [Wang, Dong, Aitc]:

$$f(x) = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i x_i + \sum_{i=1}^n c_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^n c_{ij} x_i x_j \quad (2.42)$$

Die Abbildung 2.57 zeigt das Flussdiagramm von ARSM in Anlehnung an [Wang, Dong, Aitc]:



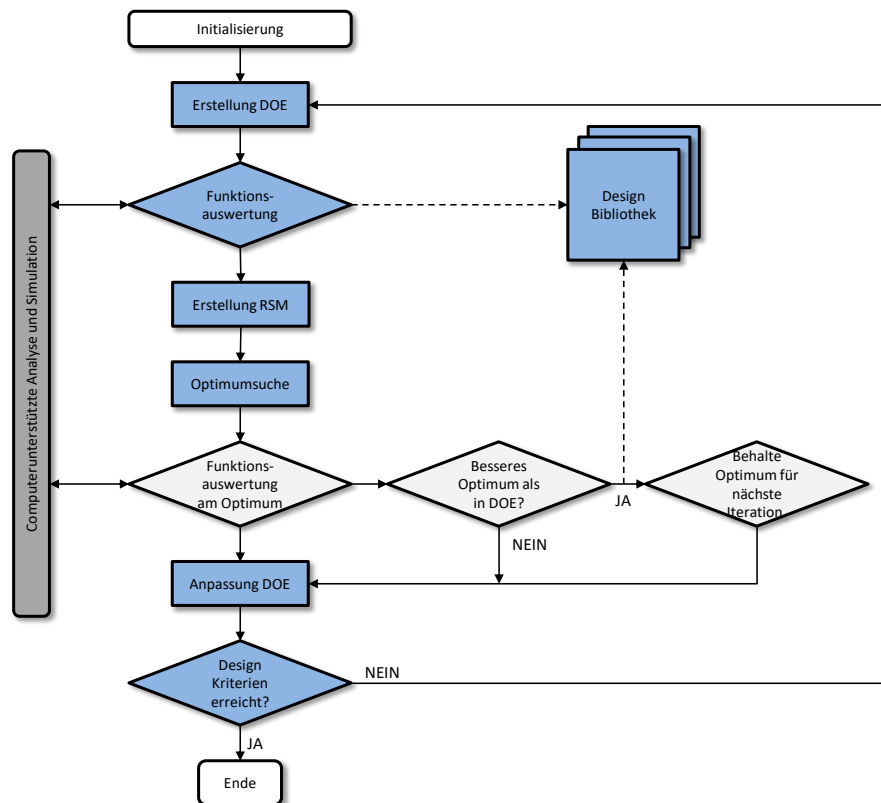


Abbildung 2.57 Flussdiagramm ARSM in Anlehnung an [Wang, Dong, Aitc]

Im ersten Schritt erfolgt eine Initialisierung, wobei die Eingangsvariablen, die Ausgangsvariablen, die Restriktionen sowie der Designraum definiert werden. Anschließend wird anhand eines Modells ein DOE erstellt. Anschließend folgt eine computerunterstützte Funktionsauswertung. Aus dem DOE wird danach ein Meta-Modell entwickelt. Anschließend wird basierend auf einem Algorithmus eine Optimierung durchgeführt. Dann folgt eine Funktionsauswertung am optimalen Punkt, wobei die Werte mit den Werten aus dem Versuchsplan verglichen werden. Falls der optimale Punkt besser ist als die Punkte des DOE, wird dieser für die nächste Iteration beibehalten und in einer Design Bibliothek gespeichert. Im nächsten Schritt kann eine Anpassung des DOE erfolgen; beispielweise durch eine Verkleinerung des Design-Raums. Schließlich werden die Design-Kriterien überprüft. Bei Erreichung des optimalen Designs bricht der Algorithmus an dieser Stelle ab. Andersfalls setzt die Iteration bei der Funktionsauswertung anhand des neuen Versuchsplans erneut ein. AHRS liefert erfahrungsgemäß gute Lösungen. Dennoch ist dieses Verfahren nur für Optimierungsaufgaben mit maximal 20 Optimierungsvariablen geeignet. Bei komplexen Optimierungsaufgaben mit größerer Variablenzahl empfiehlt es sich, naturalogische Optimierungsverfahren zu verwenden [Dyna].

## Naturalanaloge Optimierungsverfahren

Insbesondere in der Industrie stoßen gradienbasierte Algorithmen an ihre Grenzen, da die zu minimierenden Funktionen oft keine ausreichende Stetigkeits- oder Differenzierbarkeitseigenschaften aufweisen. Da im industriellen Einsatz die Suche nach dem globalen Minimum wichtiger ist, kommen hier sehr häufig naturalanaloge Verfahren zum Einsatz.

Sie basieren auf Ausleseverfahren, wie sie in der Natur stattfinden: nur das stärkste Individuum (hier das beste Design) überlebt. Die Punkte im Entwurfsraum stellen dabei die Individuen dar, woraus eine „beste“ Approximation für die Lösung des Problems gebildet wird. Abbildung 2.58 zeigt das Flussdiagramm der naturalanalogen Optimierung in Anlehnung an [Dyna].

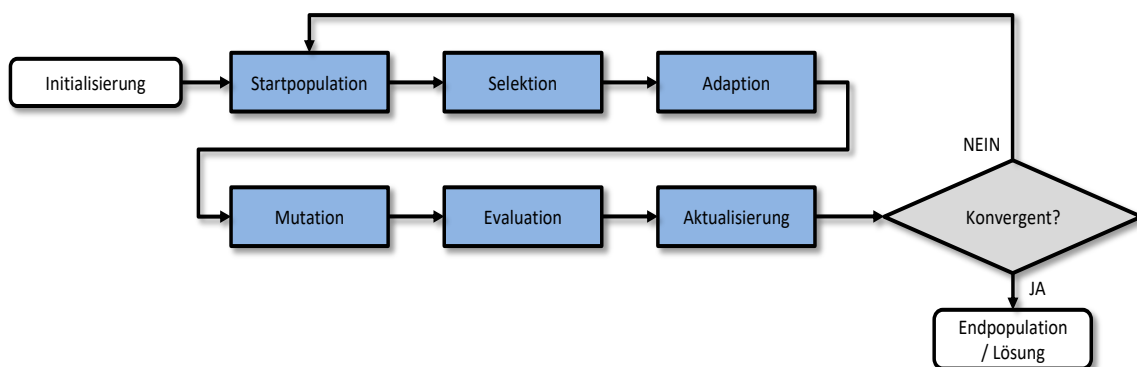


Abbildung 2.58 Allgemeines Flussdiagramm für Naturalanaloge Optimierung

Am Anfang steht die Initialisierung. Hierbei werden die Populationen (Kandidaten für eine mögliche Lösung des Optimierungsproblems) gebildet. Eine Iterationsschleife des Algorithmus wird dabei als eine Generation definiert. Für die Initialisierung gibt es unterschiedliche Methoden, wie den Einsatz eines Zufallsgenerators oder das Bilden von Diversifikationen [Hama].

Nach der Initialisierung fängt die Selektion an, wobei die „fittesten“ Individuen (beste Punkte) ausgesucht werden.

Als nächstes kommt die sogenannte Adaption. An dieser Stelle starten die eigentlichen Mechanismen einer naturalanalogen Optimierung, wie beispielweise die Rekombination bei evolutionären Algorithmen. Die neuen Individuen werden somit systematisch nach einem bestimmten Schema erzeugt.

Bei der folgenden Mutation werden im Unterschied zur Adaption neue Individuen nicht systematisch sondern zufällig erzeugt. Somit schafft man eine Art Divergenz in der Population,

womit eine frühzeitige Konvergenz des Algorithmus verhindert wird. Außerdem werden Punkte erfasst, die während der Rekombination nicht berücksichtigt werden können.

Anschließend werden während der Evaluation die neuen Individuen (Lösungen des Optimierungsproblems) bewertet. Die „fittesten“ Individuen (besten Lösungen) bilden die Grundlage der nächsten Generation. Die schlechten Lösungen des Problems kommen in ein Archiv (Aktualisierungsschritt). Schließlich wird die Konvergenz des Algorithmus geprüft. Falls die Lösungen gegen einen bestimmten Wert konvergieren, bricht der Algorithmus ab. Anderenfalls werden die neuen Individuen als Eltern für die nächste Generation (Iteration) verwendet.

### **Evolutionäre und genetischen Algorithmen**

Aufgrund ihrer großen Flexibilität kommen die evolutionären oder genetischen Algorithmen für Optimierungen in vielen Bereichen zum Einsatz. Die Form des japanischen Schnellzuges Shinkansen wurde beispielweise mit Hilfe von genetischen Algorithmen optimiert [Gerd, Lemp]. Trotz guter Anfangserfolge gibt es aufgrund stochastischer Komponenten keine Garantie, dass ein tatsächliches Optimum erreicht wird. Jedoch erfährt das Startdesign in der Regel bereits nach wenigen Iterationen eine deutliche Verbesserung. [Gerd]

Allgemein unterscheidet man zwischen zwei Strategien. Bei der evolutionären Strategie werden in der ersten Generation aus einem Individuum mehrere Nachkommen gebildet. Hierbei wird nur der „fitteste“ Nachkomme (beste Lösung) für die darauf folgenden Generation beibehalten. Die *Selektion* wird nach bestimmten Mechanismen durchgeführt. Beim genetischen Algorithmus werden mit Hilfe von *Rekombination* (engl. *Crossover*) aus den besten Individuen (Elternpaare) neue Nachkommen kreiert. Dies geschieht durch die sogenannten genetischen Operatoren. Bei der systematische Erzeugung der neuen Individuen werden die Informationen beider Elternpaare vererbt [Dyna]. Der Unterschied der beiden Methoden veranschaulicht Abbildung 2.59. Bei einer Optimierung ist es somit sinnvoll, vor der Kombination mit Hilfe der Selektion die besten Designpunkte auszusuchen.

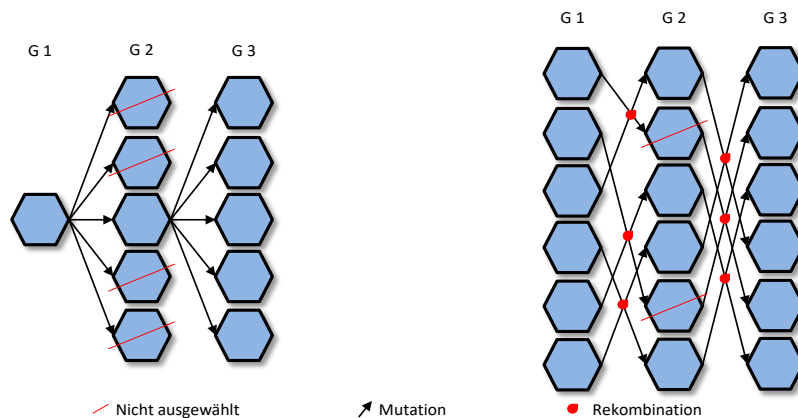


Abbildung 2.59 Unterschied zwischen der evolutionären Strategie und dem genetischen Algorithmus

### Partikelschwarmoptimierung

Während bei evolutionären und genetischen Algorithmen die Fortpflanzung der Lebewesen als Mechanismus verwendet wird, orientiert sich die Partikelschwarmoptimierung an dem Verhalten von Fisch- und Vogelschwärmen. Dabei wird die Population nicht durch eine andere ersetzt, sondern eine bestimmte Anzahl an Partikeln bewegt sich als Schwarm in einem Entwurfsraum. Die Partikel haben dabei eine definierte Richtung und Geschwindigkeit. Die Lösungen werden mit Hilfe einer geeigneten Zielfunktion bewertet. Die Richtung eines Partikels ist einerseits von der gefundenen besten Lösung abhängig, andererseits wird die Bewegung von den besten Lösungen der Nachbarpartikel beeinflusst. Diese Fortbewegung kann mit Hilfe von Vektoren beschrieben werden [Hama].

Die aktuelle Position des Partikels wird mit  $x_i^k$  definiert. Mit  $P_i^k$  wird der Ort der besten Lösungen des Partikels gekennzeichnet. Der Vektor  $v_i^k$  zeigt in die Richtung, in der sich der Partikel zum jeweiligen Zeitpunkt bewegt. Außerdem kann durch die Bildung des Betrages die Geschwindigkeit bestimmt werden. Mit der folgenden Formel können die neue Geschwindigkeit und die neue Position berechnet werden [Dyna]:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_p R_1 \times (P_i^k - x_i^k) + c_g R_2 \times (P_g^k - x_i^k) \quad (2.43)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (2.44)$$

Dabei steht  $w$  für die Trägheit, die die Abhängigkeit der neuen Richtung von der alten Richtung beinhaltet.  $R_1$  und  $R_2$  sind zwei Zufallsvektoren.  $c_p$  und  $c_g$  sind Skalierungsfaktoren, wobei  $c_p$  die Eigenbeschleunigung und  $c_g$  den globalen Beschleunigungskoeffizienten beschreiben. Die Abbildung 2.60 zeigt eine Iteration während der Partikelschwarmoptimierung. Die neue

Position entsteht dabei aus der Kombination der alten Geschwindigkeit  $v_i^k$  und der Positionen der besten globalen und lokalen Lösungen.

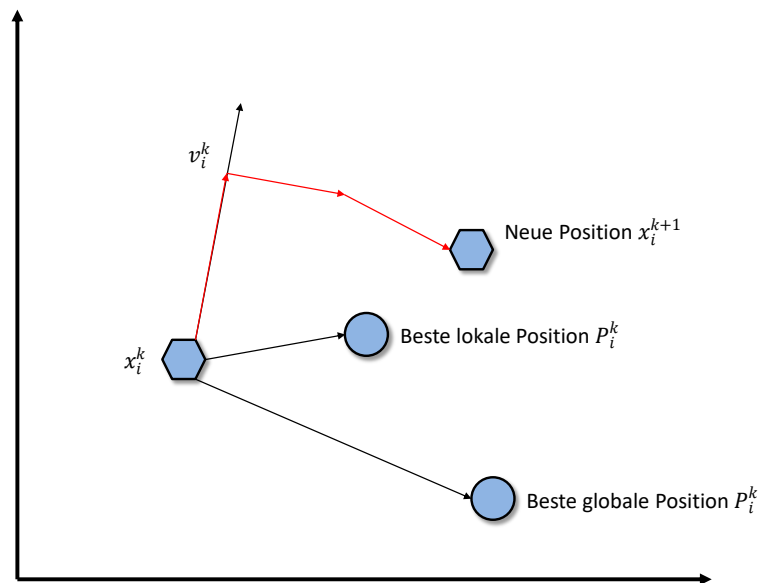


Abbildung 2.60 Neue Position eines Partikels nach einem Iterationsschritt [Dyna]

## 2.4.2 Optimierung im Kontext des Toleranzmanagements

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick der Optimierungsmöglichkeiten im Kontext des Toleranzmanagements gegeben. Dabei werden neben numerischen Methoden auch Arbeiten zu rechnergestützten Optimierungsverfahren betrachtet. Letztere bilden konkurrierende Arbeiten in Bezug auf die vorliegende Dissertation.

### 2.4.2.1 Numerische Optimierung im Kontext des Toleranzmanagements

Oftmals wird in der Literatur bei der Optimierung im Hinblick auf das Toleranzmanagement von der reinen Optimierung des Wertebereichs der Toleranz (Toleranzrange) gesprochen. Der Begriff der Toleranzsynthese tritt in diesem Kontext auf. Unter einer Toleranzsynthese wird nach [Klei2] die Zuordnung idealer Toleranzen an Einzelteilen basierend auf den Sensitivitäten der Toleranzglieder einer Schließmaßverteilung verstanden. Die Rückentwicklung eines Faltproduktes<sup>13</sup> gestaltet sich auf statistischem Weg dabei eher schwierig. Allerdings ermöglichen numerische Methoden eine gute Näherungslösung für normalverteilte

<sup>13</sup> Die resultierende Verteilung entsteht aus der Summation der Einzelverteilungen. Dieser Vorgang wird als Faltprodukt bezeichnet.

Einzeltoleranzen. Die Toleranz eines Geometrieparameters am Einzelteil berechnet sich beispielsweise nach Formel 2.45 [Klei2]:

$$\tilde{T}_i = \frac{\tilde{T}_F}{u \cdot \sqrt{\sum_i^n \frac{\alpha_i^2}{u_i^2}}} \cdot \alpha_i \quad (2.45)$$

Dabei stellt  $\tilde{T}_F$  das Schließmaß dar (Funktionsmaßtoleranz der Baugruppe),  $\tilde{T}_i$  die Einzeltoleranz,  $\alpha_i$  den Relationsfaktor und  $u, u_i$  die Streuungsweitenfaktoren. Ferner gelten die folgenden Zusammenhänge [Mane]:

$$\alpha_i = \frac{\tilde{T}_i}{\tilde{T}_{min}} \quad (2.46)$$

Der Relationsfaktor der Toleranzen  $\alpha_i$  kann nun über eine Abstufung der Toleranzen (sehr genau, weniger genau etc.) vorgenommen werden. Das Bauteil mit dem kleinsten Toleranzbereich erhält den Wert  $\alpha_i = 1$ . Die Relationsfaktoren aller anderen Toleranzen sind daran zu gewichten. Der Streuungsweitenfaktor, mit dessen Hilfe der Prozessfähigkeitsindex<sup>14</sup>  $c_{pk}$  der Einzeltoleranz sowie der Funktionsmaßtoleranz gesteuert werden kann, errechnet sich gemäß Formel 2.47 [Klei2]:

$$u_i = \frac{\tilde{T}_i}{s_i} \quad (2.47)$$

Entsprechende Werte sind Tabelle 2.2 zu entnehmen.

Tabelle 2.4 Zusammenhang  $c_{pk}$ -Streuungsweitenfaktor  $u, u_i$  nach /5/

$c_{pk}$	$u, u_i$
1,0	6
1,33	8
1,66	10
2	12

Damit lassen sich die Toleranzen aller Einzelteile aus der Funktionstoleranz der Baugruppe berechnen. Jedoch ist vorweg eine Abstufung der Toleranzen notwendig. Die Definition einer derartigen Abstufung kann sich unter Umständen als schwierig erweisen (z. B. für Bauteile, die

<sup>14</sup> Der Prozessfähigkeitsindex  $C_{pk}$  stellt das mathematische Minimum aus  $c_{pk} = \min \left[ \frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right]$  dar, wobei  $USL, LSL$  die obere bzw. untere Toleranzgrenze,  $\mu$  den Verteilungsschwerpunkt und  $\sigma$  die Standardabweichung der Verteilung entsprechen.

eine annähernd gleiche Tolerierung erhalten sollen). Deswegen ist es üblich, den Toleranzanalyse- und Toleranzsyntheseprozess iterativ zu gestalten.

Dennoch können die größten Einflussfaktoren einer Schließmaßverteilung auf diesem Wege nicht erfasst werden. Nach [Bohn, Hets2] ist eine Optimierung im Kontext des Toleranzmanagements ein „gestufter Prozess, der mehrfach in verschiedenen Ebenen“ [Bohn, Hets2] des Produktentwicklungsprozess durchlaufen werden muss. Folgende Leitfragen sind in den einzelnen Stufen kritisch zu untersuchen (siehe Abbildung 2.61).

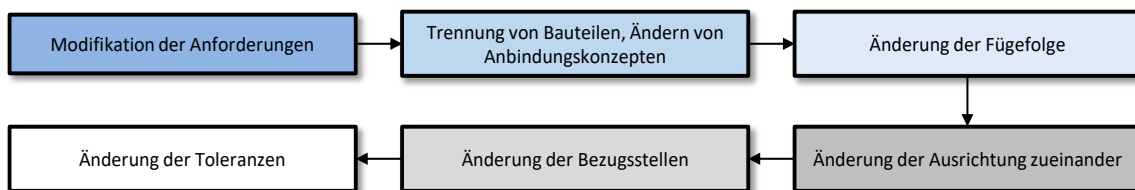


Abbildung 2.61 Leitfragen zur Optimierung im Bereich Toleranzmanagement in Anlehnung an [Bon, Hets2]

### 2.4.2.2 Rechnergestützte Toleranzoptimierungsverfahren

Heutige rechnergestützte Toleranzoptimierungsverfahren haben ihren Fokus hauptsächlich auf der Optimierung eines Eingangsparameters der Toleranzsimulation; was Abbildung 2.62 zeigt.

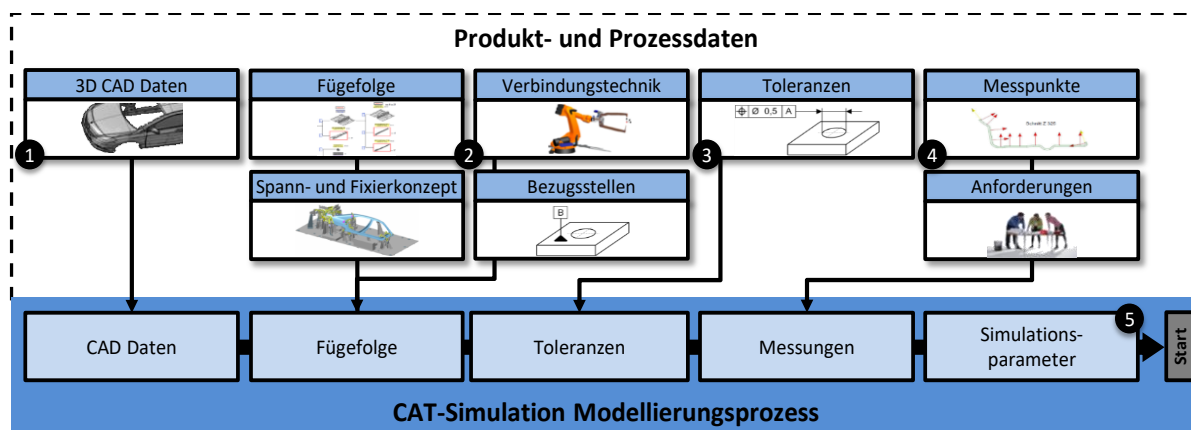


Abbildung 2.62 Eingangsparameter einer Toleranzsimulation

Beispielsweise wird in [Willi, Wu] der Nennwert eines tolerierten Elements sowie die Optimierung des zugehörigen Wertebereichs vorgestellt. Eine Erweiterung dieses Ansatzes findet sich in bei [Jean, Chan], [Jean, Chan2]. Darin werden bei der Optimierung zudem noch die Herstellungskosten der tolerierten Elemente berücksichtigt. Die Optimierung zeitabhängiger Abweichungen findet bei [Walt1], [Walt2], [Walt3] Beachtung. Auch Ansätze zur Optimierung von Ausrichtkonzepten bei Bauteilen liegen vor. So beschreiben [Sode, Lind]

eine Methode zur Bewertung von Baugruppen im Hinblick auf eine robuste geometrische Stabilität. Dieser Ansatz wird von [Moro] erweitert. Darin finden vergebene Toleranzen im Hinblick auf ein optimales Ausrichtkonzept Berücksichtigung. Es werden grundsätzliche Richtlinien zur Entwicklung und Konstruktion von robusten Aufnahmevorrichtungen definiert. [Rose] erweitert diesen Ansatz nochmals und ermöglicht die Betrachtung von komplexen Baugruppen.

Die verschiedenen Optimierungsansätze im Bereich des Toleranzmanagements, die in der Literatur zu finden sind, können grob in die fünf folgenden Disziplinen zergliedert werden:

- Robust Design und Toleranzmanagement
- Toleranz-Kostenoptimierung
- Toleranzoptimierung mithilfe der Antwortflächenmethode
- Toleranzgebungsansätze mithilfe von Optimierung
- Ausrichtungsoptimierung

Einen Überblick über derzeitigen Forschungsstand zu diesen Ansätze gibt Tabelle 2.5.

Table 2.5 Optimierungsansätze mit Bezug auf das Toleranzmanagement

Robust Design Optimierung im Bereich Toleranzmanagement	Toleranz-Kostenoptimierung	Toleranz-optimierung mithilfe der Response Surface Methode	Ansätze zur Toleranzsynthese	Optimierung von Bauteil-ausrichtungen
[Park], [Sode, Lind], [Stoc]	[Kana], [Zhan], [Löf, Herm, Söde], [Wu, Dant, Etie, Siad, Mart], [Walt1], [Walt2], [Walt3], [Willi, Wu], [Jean, Chan], [Jean, Chan2]	[Kim, Cho], [Lee]	[Iann, Sand], [Siva]	[Lepa], [Rose], [Moro], [Stein, Bohn]

In keiner der oben genannten Arbeiten wird die Optimierung aller Simulationseingangsparameter angestrebt. Die vorliegende Promotion strebt genau das an und schließt so eine wichtige Forschungslücke.



### 3 Defizite und Ableiten der forschungsrelevanten Fragestellungen

Wie zu Beginn der Arbeit erwähnt, werden in Kapitel 3 forschungsrelevanter Fragestellungen aus dem aktuellen Stand von Forschung und Technik abgeleitet. Zudem gilt es, Einflussfaktoren zu identifizieren, um die messbare Bewertung des angestrebten Forschungsfortschritts zu gewährleisten. Die Gliederung der Fragestellungen basiert dabei auf folgenden Schwerpunkten: Informationsbereitstellung, Methode, Prozess / Organisation und Systemtools (IT). Zusammenfassend wird daraus die zentrale Forschungsfrage der Arbeit formuliert. Grund für diese Art der Gliederung ist die Abhängigkeit der Bausteine untereinander. Sind die relevanten Informationen zur Abarbeitung der Problemstellung in der richtigen Art und Weise bereitgestellt, so lassen sich Methoden definieren, welche diese nutzen und weiterverarbeiten. Damit können Prozesse entwickelt werden, welche zu einer Anpassung der Zusammenarbeitsmodelle (Organisation) führen. Schlussendlich dienen Systeme der praktischen Umsetzung. Abbildung 3.1 zeigt diese Abhängigkeit der Gliederung von den forschungsrelevanten Fragestellungen.

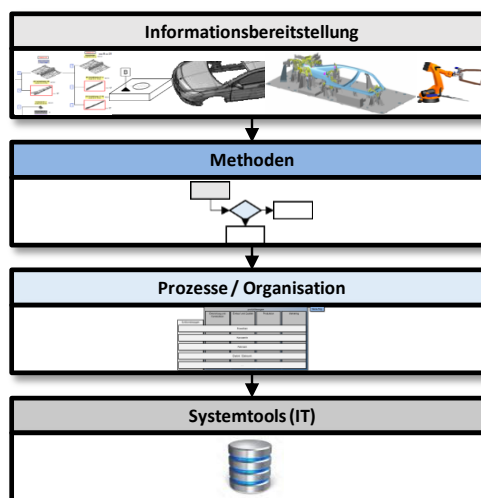


Abbildung 3.1 Abhängigkeiten der forschungsrelevanten Fragestellungen

Die Beantwortung der Fragestellung bezüglich der Informationen sowie Methoden findet sich in Kapitel 4 der Arbeit. Auch notwendige Prozessanpassungen und Vorschläge zur Veränderung der Organisation werden dort ausgearbeitet. Die Systemtools, d.h. die softwaretechnische Umsetzung des Ansatzes findet sich in Kapitel 6. Kapitel 5 widmet sich den Herausforderungen bei der Umsetzung in bestehenden Systemlandschaften.

### **3.1 Informationsflussprobleme innerhalb des Produktentwicklungsprozesses in der Automobilbranche mit dem Fokus Karosserierohbau**

Bei der Analyse des Forschungsstandes und der Technik zeigt sich, dass die Datenquellen zur Erstellung von Toleranzsimulationsmodellen sehr heterogen sind. Es werden sowohl Informationen aus dem Produktentwicklungsprozess benötigt wie CAD-Geometrien, Fügetechnik, Toleranzinformationen und Messspezifikationen als auch Produktionsentwicklungsdaten wie die Fügefolge und das Spann- und Fixierkonzept. Die Art der Information sowie das zugehörige Datenformat über den Entwicklungsprozess sind oftmals inkonsistent. Gründe dafür sind zum einen der Zeitpunkt der Entstehung der Information sowie deren Nutzung und Weitergabe durch entsprechende Fachbereiche; zum anderen der Aktualisierungsaufwand bei Änderungen. Eine automatisierte, rechnergestützte Informationsverarbeitung, wie sie beispielsweise zum Erstellen von Toleranzsimulationsmodellen nötig ist, gestaltet sich daher schwierig. Eine konsistente Informationskette in Bezug auf das Toleranzmanagement stellt hier ein Handlungsfeld dar, was nachfolgend detaillierter betrachtet wird.

#### **3.1.1 Inkonsistenz der Informationskette im Entwicklungsprozess mit Auswirkungen auf das Toleranzmanagement**

Zur effizienten Durchführung des Toleranzmanagements sind, wie eingangs bereits erwähnt, zahlreiche Informationen von anderen Gewerken erforderlich. So ist für das daraus abgeleiteten Toleranzsimulationsmodell beispielsweise der Fügegraph ein Kernbestandteil. Weiterhin werden beim Aufbau der Simulationsmodelle auch Bestandteile der Anlage digital nachmodelliert, um Abweichungen selbiger mitberücksichtigen zu können. Dazu ist die Hinterlegung der erforderlichen Metadaten im Spann- und Fixierkonzept des CAD-Systems notwendig. Die Bereitstellung dieser Daten in einem digital verwertbaren Format stellt für effizientes Toleranzmanagement eine wesentliche Schlüsselstelle dar. Die daraus abgeleitete Forschungsfrage kann daher so formuliert werden:

**Frage Information 1:** *Ist es möglich die Aufbaureihenfolge sowie Metadaten im Spann- und Fixierkonzept zu speichern sodass Folgeprozesse wie das Toleranzmanagement diese Informationen nutzen können?*

### **3.1.2 Inkonsistenz der Informationskette im Entwicklungsprozess verursacht durch das Toleranzmanagement**

Bei genauerer Betrachtung der Arbeitsergebnisse durch das Toleranzmanagement fällt auf, dass speziell während der Dokumentation der Ergebnisse der Fokus auf der manuellen Qualitätskontrolle am Ende des Produkteherstellungsprozesses liegt; d.h., die erstellte Spezifikation weist einen prüfgerechten Charakter auf (vgl. Kapitel 2.2.7). Aufgrund des historisch gewachsenen Fahrzeugentwicklungsprozesses haben sich gerade in der finalen Qualitätskontrolle digitale Tools, wie beispielsweise Spaltmessanlagen noch nicht vollumfänglich durchsetzen können. Nach wie vor dominieren veraltete manuelle Messverfahren wie Schablonen und Fühlerlehren. Im Zuge der zunehmenden Digitalisierung (Industrie 4.0) müssen allerdings bisherige Methoden und Vorgehensweisen überdacht und auf die neuen Gegebenheiten hin angepasst werden. Die in Kapitel 2.2.7 dargestellten Lücken in Bezug auf Mess- und Antaststrategie verschiedener Fugenlagen sowie formatbedingte Brüche in der Informationskette gilt es zu schließen. Eine wesentliche Forschungsfrage in Bezug auf das Toleranzmanagement lautet daher wie folgt:

***Frage Information 2:** Wie lassen sich funktionale und optische Merkmale im 3D-Mastermodell speichern sodass Folgeprozessen wie das Toleranzmanagement diese nutzen können?*

### **3.2 Methodische Verbesserungspotenziale im Entwicklungsprozess mit Fokus auf das Toleranzmanagement**

Neben Lücken in der Informationsbereitstellung werden nachfolgend auch methodische Fragestellungen in Bezug auf das Toleranzmanagement abgeleitet. Dabei wird der Toleranzmanagementprozess an sich auf methodische Defizite hin untersucht. Aufgrund der bereichsübergreifenden Tätigkeit des Toleranzmanagements kommen die Ergebnisse dieser Disziplin auch in vielen Folgeprozessen zur Anwendung. Eine bereichsübergreifende Methode zur Bereitstellung der Ergebnisse ist daher unabdingbar. Die in Kapitel 2.1.7.1 erwähnte 3D-Master Methode bietet gerade im Hinblick auf das Toleranzmanagement einen großen Vorteil. Jedoch weist diese Methode gerade in diesem Entwicklungsbereich noch einige Lücken auf. Neben den reinen Arbeitsergebnissen des Toleranzmanagements müssen auch Methoden innerhalb des Prozesses sowie die Datenquellen des Toleranzmanagementprozesses kritisch hinterfragt und gegebenenfalls angepasst werden.

### 3.2.1 Analyse der Verbesserungspotenziale im Bereich Toleranzsimulation

Wie in Kapitel 2.3.3 dargestellt, erfordert der Produktentwicklungsprozess zu gewissen Meilensteinen und Quality Gates die Absicherung des jeweiligen Standes des Toleranzkonzeptes. Die dazu benötigten Toleranzsimulationsmodelle werden dabei detailliert und an geänderte Gegebenheiten angepasst. Dazu findet bisher ein manueller Übertrag der Informationen statt; d.h., aus den angrenzenden Systemen PDM / CAD gilt es, die erforderlichen Daten zu sichten und in das Toleranzsimulationssystem zu übertragen. Beachtet man die in Kapitel 3.1 dargestellten Defizite der Informationskette über das Toleranzmanagement hinaus, so mündet eine konsistente Datenbereitstellung in einen durchgängigen Toleranzmanagementprozess. Die entsprechende methodische Forschungsfrage in Bezug auf die Toleranzsimulation lautet daher wie folgt:

**Frage Methode 1:** *Welche Methode ist notwendig, um eine Toleranzsimulationssoftware mit dem PDM-System sowie CAD-System zu koppeln?*

Die derzeitige Vorgehensweise zum Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen im Karosserierohbau wurde bereits in Kapitel 2.3.6 näher erläutert. Gegenwärtig erfolgt der Aufbau dieser Modelle händisch und birgt aufgrund der Reduzierung der Entwicklungszeit sowie der menschlichen Komponente Risiken, welche zu einem Verlust an Reifegrad führen können. Gerade vor dem Durchschreiten von entsprechenden Quality Gates tritt ein erhöhtes Änderungsaufkommen auf [Schu, Stöl, Stra]. Um zur Freigabe valide Toleranzkonzepte den Folgeprozessen zur Verfügung zu stellen, müssen in kurzer Zeit die Simulationsmodelle neu aufgesetzt oder überarbeitet werden. Deshalb ist auch beim Aufbau des Simulationsmodelles eine Rechnerunterstützung unbedingt erstrebenswert. Die damit einhergehende Forschungsfrage lautet daher:

**Frage Methode 2:** *Welche Methode ist erforderlich, um einen automatisierten Aufbau eines Toleranzsimulationsmodells zu erzielen?*

### 3.2.2 Analyse der Verbesserungspotenziale im Bereich Optimierung und Toleranzsimulation

Basierend auf der automatisierten Toleranzsimulationsmodellerstellung lassen sich weiterführende Untersuchungen der Daten umsetzen. Beispielsweise kann heute schon mithilfe der Toleranzsimulation eine Aussage getroffen werden, inwiefern gewisse Toleranzen

der Toleranzkette ein entsprechendes Qualitätsmerkmal beeinflussen. Diese sog. Beitragsleisteranalyse stellt eine lokale Sensitivitätsanalyse der Toleranzdaten dar. Weiterführende Optimierungen der Daten werden derzeit händisch und basierend auf langjährigem Expertenwissen durchgeführt. Die steigende Produktkomplexität erschwert mehr und mehr das Auffinden von Schlüsselparametern. Eine Rechnerunterstützung ist daher unabdingbar. Die lokale Sensitivitätsanalyse des Toleranzsimulationsprogramms muss daher in eine globale Analyse überführt werden. Zudem müssen weitere Eingangsdaten der Toleranzsimulation Berücksichtigung finden. Diese Anforderungen münden in der Formulierung der nächsten Forschungsfrage:

**Frage Methode 3:** *Wie lässt sich ein Optimierungsprogrammssystem mit der Toleranzsimulationssoftware koppeln sodass die Eingangsdaten der Toleranzsimulation einer Optimierung unterzogen werden können?*

Zur Messung des durch informationstechnische und methodische Veränderungen innerhalb und außerhalb des Toleranzmanagements erreichten Fortschritts müssen validierbare Erfolgskriterien wie die Verkürzung der Prozessdurchlaufzeit oder die Erhöhung der Produktqualität abgeleitet werden. Dies kann anhand eines Referenzmodells nach [Bless] geschehen. In Bezug auf die informationstechnischen und methodischen Fragen soll als Erfolgskriterium die Umsetzbarkeit der Änderungen in einem produzierenden Unternehmen dienen. Basierend auf diesem Erfolgskriterium können mithilfe des „Initial Impact Modells“ nach [Bless] die entsprechenden Beitragsleister für das Kriterium „Umsetzbarkeit von Änderungen“ erarbeitet werden. Im vorliegenden Fall sind diese Beitragsleister relevant:

- Digitale Datengrundlage (konsistente Daten, geeignete Formate, Metainformationen innerhalb der Daten)
- Austauschbarkeit von Daten durch Schnittstellen
- Ausarbeitung von Algorithmen zur reibungslosen Datenverarbeitung

Eine Optimierung an Beitragsleister soll letztendlich die Umsetzbarkeit des Ansatzes in der produzierenden Industrie ermöglichen und somit einen Forschungsfortschritt darstellen.

### **3.3 Prozessuale und organisatorische Verbesserungspotenziale im Entwicklungsprozess mit Fokus auf dem Toleranzmanagement**

#### **3.3.1 Kritische Pfade des Entwicklungsprozesses mit Auswirkungen auf das Toleranzmanagement**

Bei der Entwicklung von Großserienprodukten findet wie in Kapitel 2.1.4 erwähnt ein angepasster simultaner Entwicklungsprozess statt. An gewissen Meilensteinen erfolgt durch einzelne Fachbereiche eine Datenbereitstellung, um Folgeprozessen die Weiterarbeit zu ermöglichen und eine übergreifende Abstimmung zu gewährleisten. Produktdatenmanagementsysteme dienen dabei als Datenverwaltungstools mit integriertem Freigabemanagement [Katz1]. Die Freigabe der Produktdatenmodelle obliegt dem Konstruktionsingenieur (sog. Bauteilverantwortlicher). Dieser trägt die Verantwortung für die gesamten CAD-Geometrien nebst zusätzlicher am Datensatz verankerter Informationen (z. B. PMI-Informationen). Zu jedem Freigabestand (vgl. Freigaben in Kapitel 2.1.2) ist ein in sich konsistenter Datenstand bereitzustellen. Aufgrund der zahlreichen Schnittstellen im Aufgabenfeld eines Konstruktionsingenieurs kommt es v. a. vor Freigaben vermehrt zu Konstruktionsänderungen [Schu, Stöl, Stra]. Ein wesentlicher Grund dafür sind die zahlreichen Interdependenzen der Daten, die sich sukzessive im Laufe des Entwicklungsprozesses herauskristallisieren und sind ständig verändern bzw. weiterentwickeln. Die Änderung einer Komponente kann damit erhebliche Einflüsse auf umliegende Bauteile haben. Zum entsprechenden Meilenstein (Datenbereitstellungspunkt) sind diese Änderungen fristgerecht einzuarbeiten, um die Bereitstellung eines in sich konsistenten Datenstand zu gewährleisten. Das Toleranzmanagement als bereichsübergreifende Disziplin trägt schlussendlich die Verantwortung der Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten (technisch wie optisch). Dies gilt für den Serienproduktionsprozess unter Ausnutzung der Toleranzlagen. Die dabei eingesetzten Toleranzsimulationen erfordern zur Konzeptabsicherung immer den aktuellen konsistenten Datenstand, wie er allerdings erst nach Datenfreigabe vorliegt. Eine intensive Abstimmung sowie permanente Datenaktualisierung zwischen Toleranzmanagement und Konstruktionsabteilung ist daher unabdingbar. Der in Kapitel 2.3.5 dargestellte Produktentwicklungsprozess sieht aus Sicht des Toleranzmanagements eine solche permanente Datenaktualisierung zwischen Datenfreigaben jedoch nicht vor. Die Verantwortung des Toleranzmanagements für die Funktionserfüllung der Konstruktion in

ihren Toleranzlagen im Serienproduktionsprozess erfordert über den gesamten Entwicklungsprozess ein Mitsprache- bzw. sogar Vetorecht. Daraus leitet sich die erste prozessuale Forschungsfrage wie folgt ab:

**Frage Prozess 1:** *Wie sollte das Toleranzmanagement im Unternehmen organisatorisch verankert sein, um gezielt Einfluss auf Produkt und Prozess nehmen zu können?*

Eine weitere prozessuale Forschungsfrage stellt die folgende dar:

**Frage Prozess 2:** *Welche Prozessstruktur wird für ein im Produktentwicklungsprozess und Produktionsentwicklungsprozess tief verankertes Toleranzmanagement benötigt und welche Meilensteine sind hierbei erforderlich?*

Neben den prozessualen Lücken liegt ein Bruch in der Informationskette beim Erzeugen von produktspezifischen Informationen vor, der nachfolgend noch ausführlich erläutert wird. Das Hauptaugenmerk liegt hier zunächst auf Produkt- und Prozessdaten, die durch das Toleranzmanagement weitergenutzt und verarbeitet werden und als Grundlage für weitere durch das Toleranzmanagement erstellte Informationen dienen (Toleranzmanagement externer Daten).

### **3.3.2 Prozessuale Verbesserungspotentiale hinsichtlich der Informationsflussdefizite**

Wie in Kapitel 2.3.6.3 erläutert, werden zum Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen im automobilen Rohbau unterschiedliche Informationen benötigt. Diese gliedern sich einerseits in produktspezifische Informationen wie CAD-Geometrien, Fügetechnik, Toleranzinformationen, und Messspezifikationen, andererseits in produktionsspezifische Informationen, wie die Fügefolge und das Spann- und Fixierkonzept. Eine prozessuale Ursache der in Kapitel 3.1 erläuterten Informationsflussprobleme liegt möglicherweise in fehlenden Datenbereitstellungspunkten dieser Informationen. Daher lauten die prozessualen Fragestellungen wie folgt:

**Frage Prozess 3:** *Welche prozessualen Schritte (Meilensteine) sind notwendig, um einer Inkonsistenz der Informationskette v. a. in Bezug auf die Produktionsplanung sowie die Qualitätssicherung / Messtechnik entgegenzuwirken?*

Auch innerhalb des Toleranzmanagements liegt eine gewisse Inkonsistenz in der Informationskette vor. Wichtige Arbeitsergebnisse des Fachbereichs werden in nicht digital

verwertbaren Datenformaten erzeugt und von nachfolgenden Prozesspartnern aufwändig in die erforderlichen Systeme händisch übertragen. Dieser Bruch findet sich z. B. bei den Arbeitsergebnissen Funktionsmaßkatalog sowie Fugen- und Radienplan (vgl. Kapitel 2.3.5). Zur Vermeidung dieser Bruchstellen innerhalb der Informationskette sind weitere Meilensteine zu definieren. Die entsprechende Forschungsfrage lautet:

**Frage Prozess 4:** *Welche prozessualen Schritte (Meilensteine) sind notwendig, um die Inkonsistenz der Informationskette v. a. innerhalb des Toleranzmanagements zu schließen?*

Ein leicht messbares Erfolgskriterium ist bei den prozessualen Fragestellungen der reibungsloser Ablauf der Methode im Umfeld der Serienproduktion eines Unternehmens. Auch hier können die entsprechenden Beitragsleister systematisch ausgewiesen werden:

- digitale Datengrundlage (konsistente Daten, geeignete Formate, Metainformationen innerhalb der Daten)
- vorhandenes Datenfreigabemanagement (z. B. Verankerung von Informationen im PDM-System)

### **3.4 Systemtechnische Verbesserungspotenziale im Entwicklungsprozess mit Fokus auf dem Toleranzmanagement**

Die heute auf dem Markt verfügbaren Toleranzsimulationsprogramme weisen einige Defizite in Bezug auf die Automatisierbarkeit auf. So ist es häufig den Systemen nicht möglich, ein Toleranzsimulationsmodell, das in einer externen Applikation generiert wurde, einzulesen. Grund hierfür ist die fehlende Schnittstelle für das Einlesen eines neutralen Datenformates wie XML. Lediglich das Einlesen von Informationen, die zu einem Modell gehören, wie Toleranzen, Messungen, Zusammenbauoperationen ist bei bestehendem Modellbaum möglich. Dazu muss jedoch die Software vom Anwender ausgeführt werden. Auch in Bezug auf eine automatisierte Simulation weisen die meisten Systeme auf dem Markt Defizite auf. So ist es oftmals nicht möglich, Simulationsmodelle vom Kommandozeileninterpreter in einer Stapelverarbeitung ausführen zu lassen (Batch-Call). In Bezug auf die weiterführend geplante Anbindung eines Optimierers ist das hinderlich.

Beim Erstellen der Toleranzsimulationsmodelle ist die Übertragung aller erforderlichen Informationen aus dem PDM-, CAD-System notwendig, um daraus ein Toleranzsimulationsmodell zu generieren. Der Aufbau solcher Modelle ist sehr zeitintensiv



und erfordert Expertenwissen. Diese Schwachstellen führen zur Formulierung der systemtechnischen Forschungsfrage:

**Frage System 1:** *Welche softwaretechnische Unterstützung ist notwendig, um einen automatisierten Toleranzsimulationsdurchlauf im laufenden Entwicklungsprozess ausführen zu können?*

Zusammenfassend lässt sich aus diesen Forschungsfragen die zentrale Fragestellung der vorliegenden Promotion formulieren:

**Zentrale Forschungsfrage:** *Wie können Produkt- und Prozessdaten in der Karosserieentwicklung mit Hilfe von Toleranzsimulationen effizient optimiert werden?*



## 4 Informationsbereitstellung, Methoden und Prozessentwicklung

Zur besseren Übersichtlichkeit des Kapitels sollen die einzelnen Teilbereiche (Informationsbereitstellung, Methoden, Prozessentwicklung in Systeme (IT-Tools)) im Gesamtkontext beschrieben werden. Abbildung 4.1 zeigt die verschiedenen Informationen; die während des Produktentwicklungsprozesses entstehen und zur Durchführung des Toleranzmanagements (vgl. Kapitel 2.3.4) notwendig sind. Defizite in der Informationsbereitstellung aus Kapitel 3.1 sind entsprechend gekennzeichnet (I1-I2). Die Interdependenzen der einzelnen Informationen sind in Kapitel 4.2.1.1 dargestellt und werden deswegen hier nicht weiter beschrieben. Methodische Defizite zur Weitergabe der einzelnen Informationen an das Toleranzmanagement sind aufgeführt (M1-M3). Zum reibungslosen Umsetzen des Konzeptes wurden in Kapitel 3.3 prozessuale und organisatorische Verbesserungspotenziale für verschiedene Gewerke adressiert (P1-P4). Weiterhin sind auch entsprechende bestehende oder gegebenenfalls noch zu entwickelnde Systeme (IT-Tools) an der Umsetzung des Konzeptes beteiligt. Auch diese zeigt Abbildung 4.1 (S1).

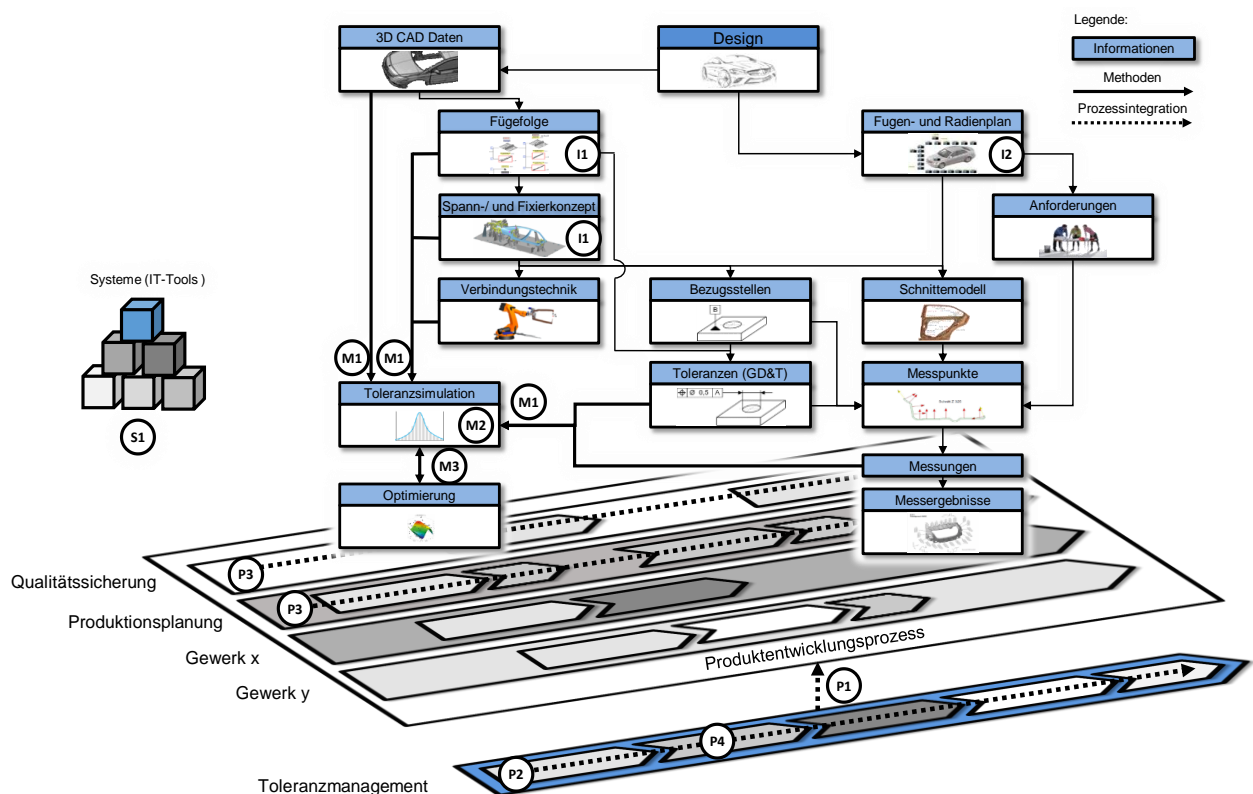


Abbildung 4.1 Gesamtüberblick der Forschungsfragen im Kontext der Arbeit

## 4.1 Informationsbereitstellung für effizientes Toleranzmanagement

Zunächst gilt es die in Kapitel 3.1 aufgezeigten Defizite in der Informationskette in Bezug auf das Toleranzmanagement zu schließen. Diese Aufgabe beginnt mit der digitalen Fügefolge. Es erfolgt somit die Beantwortung der Forschungsfrage **Information 1** (I1 in Abbildung 4.1).

### 4.1.1 Methode zur Archivierung der Fügefolge im PDM-System

Zur Archivierung der Fügefolge im digital verwertbaren Format gilt es zunächst, ein grundsätzliches Datenformat zu definieren. Dazu muss im ersten Schritt ein Überblick der Nutzer einer digitalen Fügefolge im Produktentwicklungsprozess gegeben werden. Nachfolgend lassen sich die entsprechenden Softwaresysteme eingrenzen, welche eine solche Fügefolge verarbeiten sollen. Auf dieser Grundlage ist die Spezifizierung eines Standardaustauschformats möglich.

#### 4.1.1.1 Datennutzer und Systeme zum Einsatz der digitalen Fügefolge

Bei Betrachtung der Datennutzung von digitalen Fügefolgen lassen sich prinzipiell drei Typen von Datennutzern identifizieren:

- Entwicklung
- Produktionsplanung
- Produktionswerk

Abbildung 4.2 zeigt eine detailliertere Darstellung der Datennutzer. Seitens der Entwicklung lassen sich die Bereiche Konstruktion sowie Toleranzmanagement als Nutzer der Fügefolge spezifizieren. Dabei erfolgt im Konstruktionsbereich vor allem die Anpassung der Konstruktion an Randbedingungen, die in Bereichen der Produktionsplanung aufgetreten sind. Dies betrifft weitgehend die Dokumentation der Verbindungstechnik im Datensatz. Weiterhin nutzt das Toleranzmanagement das Fügefolgedokument zum Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen, die zur Absicherung erarbeiteter Toleranzkonzepte dienen.

Auf Seiten der Produktionsplanung erfolgt ein Weiterverarbeiten der Fügefolge im Bereich der Layoutplanung (Einrichtung der Anlage, Materialflusssimulation, stationsgerechte Verteilung der Fügeelemente). Zudem werden Zugänglichkeitssimulationen mit dem gängigen Schweißzangensortiment durchgeführt. Weiterhin dient die Fügefolge als Basisdokument zur

Erstellung des Spann- und Fixierkonzeptes sowie zur Vergabe der ersten prototypischen Aufnahmen für den Aufbau der Hardware-Prototypen.

Im Bereich des jeweiligen Produktionswerks dient die Fügefolge zur stationsgerechten (d.h. in der entsprechenden Aufbaustufe befindlichen) Speicherung von Messdaten (Auditmessungen).

Damit hat eine Änderung der Fügefolge Auswirkungen auf viele nachgelagerte Prozesse. Zur Erleichterung der Abschätzung des Änderungsaufwandes zeigt Abbildung 4.2 einen Überblick über die Systemlandschaft der ineinandergreifenden Prozesse. Daraus wird der Mehrwert eines standardisiertes Austauschformat der Fügefolge deutlich.

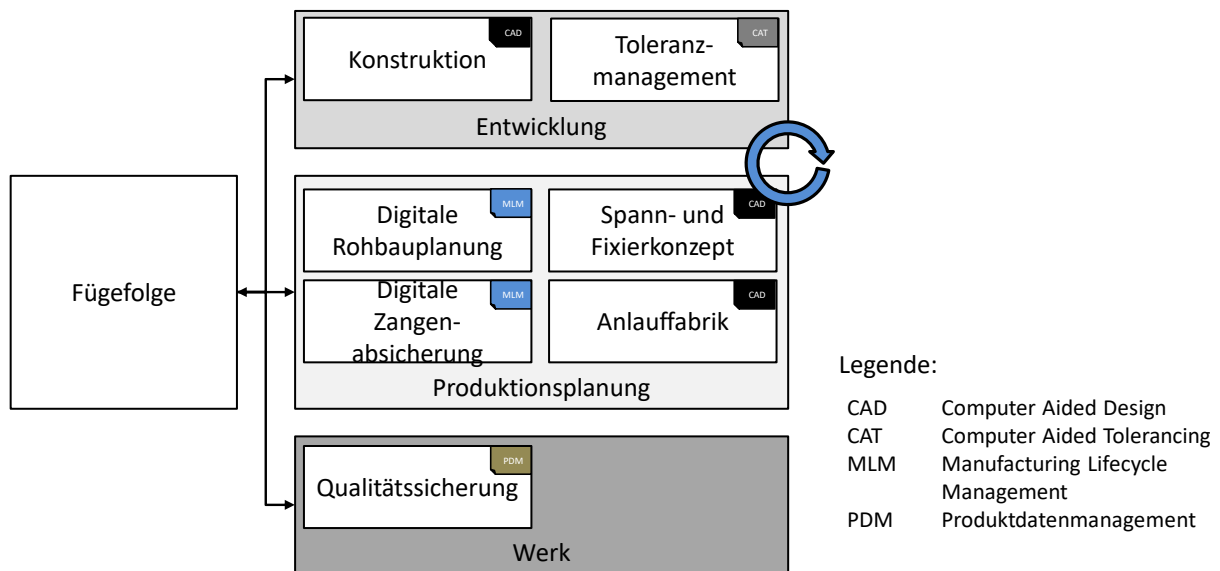


Abbildung 4.2 Datennutzer der Fügefolge im Karosserierohbau

Im Bereich der Entwicklung findet die Fügefolge hauptsächlich im CAD-System des Produkts Verwendung. Dabei werden Änderungen nach enger Abstimmung zwischen den beiden Bereichen Entwicklung und Produktionsplanung (letztere erstellt die Fügefolge) eingebracht. Zusätzlich zum CAD-System wird im Bereich des Toleranzmanagements die Fügefolge beim Aufbau des Simulationsmodells genutzt. Dies kann einerseits in CAD-integrierten Toleranzsimulationssystemen erfolgen oder in eigenständig laufenden CAT-Anwendungen.

Seitens der Produktionsplanung kommen vor allem rechnergestützte Planungssysteme zum Einsatz. Beispielsweise erfolgen in CAM-Systemen die Layoutplanung der Anlage oder die Zugänglichkeitsprüfung für Schweißzangen. Zudem finden Ablaufsimulationen sowie Materialflusssimulationen Anwendung.

Im produzierenden Werk erfolgt zur Gewährleistung eines gleichbleibenden hohen Qualitätsstandards ein Audit. Zur Datenrückführung und im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses erfolgt ein entwicklungsseitiger Zugriff auf diese Messdaten. Die Speicherung dieser Daten geschieht im Produktdatenmanagementsystem, untergliedert in die entsprechenden Aufbaustufen des Produkts.

#### **4.1.1.2 Auswahl eines geeigneten Formats zur Bereitstellung der digitalen Fügefolge in Folgeprozessen**

Die heterogene Systemlandschaft innerhalb der einzelnen Gewerke fordert heute schon ein standardisiertes Austauschformat. Im Hinblick auf die digitale Fügefolge stehen dabei Aspekte wie Lesbarkeit, Übersichtlichkeit sowie Änderungsfreundlichkeit im Vordergrund. Im automobilen Umfeld hat sich aus diesen Gründen ein Office Dokument über die Jahre durchgesetzt [Burr]. Den vielfältigen Anforderungen kann dieses Format aber nicht gerecht werden. Die rechnergestützte Auswertbarkeit, die Lesbarkeit durch den Programmierer, die Möglichkeit der zentralen Archivierung von verschiedenen Ständen, die einfache Adaption auf konzeptähnliche Baugruppen sowie eine internationale Standardisierung kann nur ein anderes Format gewährleisten. Aus diesem Grund soll ein geeigneteres Format zur Archivierung der Fügefolge mithilfe einer Nutzwertanalyse (VDI 2225) ausgewählt werden.

Als zu bewertende Alternativen sollen Metasprachen herangezogen werden, d.h. Sprachen, mit deren Hilfe zahlreiche andere Objektsprachen definiert werden können. Zur Auswahl stehen die Formate JSON, YAML, XML sowie das XML ähnliche Format AML.

JSON ist ein Format, welches grundsätzlich unabhängig von Programmiersprachen ist, jedoch einigen Konventionen aus den C-basierten Sprachen folgt. Grundsätzlich baut dieses Format auf zwei Strukturen auf, die es in so gut wie jeder Programmiersprache gibt: Objekte und Listen von Werten. Ziel dieses Formats ist es, eine einfache Lesbarkeit / Erstellung seitens des Programmierers zu gewährleisten; zudem soll es für eine Maschine einfach zu parsen sein [www08].

YAML basiert auf drei primitiven Strukturen: Hashes (Knotenelementen), Objektlisten sowie Skalaren. Damit ist ein Datenaustausch zwischen den lebhaften, neueren Programmiersprachen (PERL, PYTHON, PHP) möglich. Ein weiteres Ziel von YAML ist die im Vergleich zu JSON die deutlich bessere Lesbarkeit für Anwender. Dies hat jedoch den Nachteil, dass das maschinelle Erzeugen sowie Parsen komplexer wird. Das Format ist erweiterbar und

unterstützt One-Pass Verarbeitung, ohne dass dabei ein Modell beim Einlesen in den Speicher als Baumstruktur aufgebaut werden muss [www09].

XML ist die Grundlage der zuvor erwähnten Austauschformate und basiert auf zwei elementaren Bausteinen: den Elementen, die einen Typ beinhalten, der über einen Namen identifiziert werden kann (generic identifier) und den Attributen, welche die Spezifikation, Namen und Werte haben. Durch die Verwendung von DTD- bzw. XML-Schemata ist es möglich, den Inhalt eines XML von seinem Layout zu trennen. Sind Anpassungen im Layout erforderlich (beispielsweise das Hinzufügen weiterer Attribute), so muss bei einer Vielzahl an gleichartigen XML Dokumenten nur das zugehörige DTD- bzw. XML-Schema verändert werden. Damit lässt sich dieses Format für ein breites Spektrum von Anwendungen nutzen. XML ist ferner kompatibel zu SGML, einer international genormten Metasprache und erweitert diese [www10].

AML stellt eine Sonderform der XML Sprache dar. Grundsätzlich gilt auch für AML die strikte Trennung zwischen Syntax und Semantik. Dies ist das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zu Austauschformaten wie STEP [Schm, Lüde]. Der wesentliche Einsatzbereich für AML-Anwendungen liegt im Bereich der Anlagenplanung. Grundgedanke des Formats ist es, eine Architektur bereitzustellen, mit deren Hilfe Entwicklungsdaten bereichs- und firmenübergreifend trotz heterogener Systemlandschaft ausgetauscht werden können [Schm, Lüde]. Grundsätzlich weist AutomationML eine modulare Struktur auf, die es ermöglicht, bereits existierende XML basierte Datenformate darin einzubetten und zu kombinieren. Zudem bestehe eine entsprechende Standardisierung der International Electrotechnical Commission (IEC 62714).

#### **4.1.1.3 Kriterien beim Vergleich der verschiedenen Formate**

Zum Vergleich der verschiedenen Formate sollen die nachfolgenden Kriterien herangezogen werden.

- Entwicklungsstand:

Der Entwicklungsstand erfasst die offizielle Einführung des Formates durch eine entsprechende Beschreibung. Es ist davon auszugehen, dass früher eingeführte Metasprachen aufgrund der kontinuierlichen jahrelangen Weiterentwicklung einen

höheren Reifegrad aufweisen. Zudem erfolgen zu den jeweiligen Versionsständen Korrekturen am Format (Bugfixing).

- **Anwendungsbreite:**

Die Breite der Anwendung beschreibt die Vielfalt der Anwendungen, die durch die entsprechende Metasprache miteinander kommunizieren können. Eine domänenübergreifende Kommunikation erhöht hier den Stellenwert des entsprechenden Formats.

- **Metasprache:**

Zur Beschreibung des Layouts einer Metasprache existieren sogenannte übergeordnete Metamodelle. Darin verankert sind Informationen über das Layout, sowie Informationen, welche Elemente und Attribute bei der Layout-Beschreibung anzuwenden sind. Je abstrakter ein solches Modell beschrieben werden kann (Ebenen an Metamodellen), umso flexibler lässt sich die Sprache in unterschiedlichen Domänen adaptieren.

- **Rechnergestützte Auswertbarkeit:**

Die Lesbarkeit der Metasprache von Mensch und Maschine stellt ein wichtiges Kriterium bei der Bewertung der Formate dar. Lässt sich das Format einfach parsen; so kann es selbst bei sehr großen Modellen schnell durch eine entsprechende Schnittstelle verarbeitet werden. Ist das Format zudem lesbar, so können Fehler bei der Formaterstellung durch eine Anwendung einfach erkannt werden.

- **Beliebige Erweiterbarkeit, Änderungsfreundlichkeit:**

Auch die Erweiterbarkeit sowie Änderungsfreundlichkeit der Metasprache auf neue bzw. sich verändernde Gegebenheiten sind wichtige Anforderungen.

- **Internationale Standardisierung:**

Eine Standardisierung der Metasprache auf internationaler Ebene erleichtert die technische sowie kommunikative Zusammenarbeit der beteiligten Disziplinen. Zudem vereinfacht eine Normierung den Austausch der Informationen und ermöglicht so die Schaffung von standardisierten Schnittstellen in verschiedenen CAx-Systemen.

Weitere Kriterien, die bei der Bewertung der Formate herangezogen werden, stellen die Möglichkeiten der Archivierung des Formates in PDM-Systemen sowie die Datenfreigabe im PDM-System dar.



#### 4.1.1.4 Gewichtung der Kriterien

Basis für die Gewichtung der Anforderungen bildet die im Anhang A dargestellte AHP-Kontingenztabelle (Analytische-Hierarchieprozess-Kontingenztabelle) [Luna]. Die Festlegung der Gewichtung erfolgte für diese Arbeit in Absprache mit Verantwortlichen der jeweiligen Fachabteilung .

Die höchste Priorität (Gewichtung 10) zur Bereitstellung der digitalen Fügefolge in Folgeprozessen stellen die nachfolgenden Kriterien dar:

- Entwicklungsstand / Anwendungsbreite:

Liegt die Markteinführung einer Metasprache länger zurück, so ist davon auszugehen, dass sie ausgereift ist. Das bedeutet, es liegen neue Versionen vor, in welchen die anfangs auftretenden Schwierigkeiten behoben worden sind (hoher Entwicklungsstand). Jedoch ist auch zu bedenken, dass bei neueren Metasprachen die Probleme anderer Metasprachen Berücksichtigung gefunden haben. Der Entwicklungsstand alleine ist damit also nicht ausschlaggebend für den Reifegrad einer Metasprache.

Je länger die Markteinführung einer Metasprache zurück liegt, umso höher ist deren Verbreitungsgrad und ihre Anwendungsbreite. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich in den betrachteten domänenübergreifenden Systemen eine Schnittstelle schaffen lässt, die dieses Format verarbeiten kann. Das Hauptaugenmerk liegt hier auf Anwendungen im automobilen Umfeld (Produktionsplanung, Fahrzeugentwicklung)

- Metasprache / rechnergestützte Auswertbarkeit:

Ist eine Metasprache vorhanden, so lassen sich das Layout sowie Informationen über die notwendigen Elemente und Attribute austauschen. Der Austausch dieses Klassengerüsts stellt die bei der Schaffung von Schnittstellen die Grundlage dar und ermöglicht zudem eine rechnergestützte Verarbeitung des Formats.

Es folgen Kriterien mit geringerer Gewichtung (Gewichtung 5):

- Beliebige Erweiterbarkeit, Änderungsfreundlichkeit, internationale Standardisierung:  
Zur Anbindung weiterer Domänen ist es erforderlich, beliebige Erweiterungen an der bestehenden Metasprache durchzuführen; d.h. die innerhalb der Metasprache deklarierten Elemente und Attribute sowie das Layout müssen sich an wandelnde





Gegebenheiten adaptieren lassen. Bei Vorliegen einer genormte Metasprache ist der domänenübergreifende Informationsaustausch erheblich leichter.

#### **4.1.1.5 Formatauswahl basierend auf der Bewertung der Formate zur Bereitstellung der digitalen Fügefolge**

Abbildung 4.3 zeigt die Ergebnisse der Nutzwertanalyse in Bezug auf die erwähnten Kriterien, mit deren Hilfe die verschiedenen Metasprachen bewertet wurden. Zudem findet sich hier die Bewertung des ursprünglich verwendeten Formats PowerPoint. Auffällig ist der hohe Akzeptanzgrad der Metasprache XML. Begründen lässt sich dies durch den Entwicklungsstand dieser Metasprache und dem damit einhergehenden sehr hohen Reifegrad. Dadurch erhält die Metasprache XML hier die höchste Bewertung (drei Punkte). Weiterhin basieren XML, JSON und AML auf der international genormten Metasprache SGML, welche einem einheitlichen Standard zur Formulierung unterliegt und so die Schaffung von Schnittstellen für völlig unterschiedliche Anwendungen erleichtert. YAML wurde dagegen deutlich später auf den Markt gebracht, was einen etwas niedrigeren Entwicklungsstand bedingt. Zudem basiert diese Sprache nicht auf dem SGML Standard, wodurch ein niedrigeres Ergebnis beim Kriterium internationale Standardisierung erzielt wird.

Bei genauerer Betrachtung der Anwendungsbreiten der Metasprachen fällt auf, dass die AML hier am besten abschneidet (drei Punkte). Grund dafür ist das Entwicklungsziel dieses Formats. AML wurde speziell für den Austausch von Engineering-Daten im automobilen Umfeld entwickelt, wobei besonders der Aspekt Anlagenplanung berücksichtigt worden ist. Die Fügefolge stellt ein Kernelement der Produktionsplanungsdaten dar, wodurch AML zur Bereitstellung der Fügefolge prädestiniert scheint.

Bei Kriterien, wie einem vorhandenen Metamodell, rechnergestützter Auswertbarkeit sowie beliebiger Erweiterbarkeit und Änderungsfreundlichkeit, weisen die vier verglichenen Formate keine Defizite auf (drei Punkte).

Kriterien	Gewichtung	Bewertung				Ausgangssituation
		Variante 1 (XML) 	Variante 2 (JSON) 	Variante 3 (YAML) 	Variante 3 (AML) 	
Entwicklungsstand (Markteinführung)	10	●●●● (1998)	●● (2005)	● (2011)	●● (2008)	●●●● (ca. 1990)
Anwendungsbreite	10	●●	●●	●●	●●●●	●●●●
Metasprache	10	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●
Rechnergestützte Auswertbarkeit / Lesbarkeit	10	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●
Beliebige Erweiterbarkeit / Änderungsfreundlichkeit	5	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●
Internationale Standardisierung	5	●●●●	●●	●●	●●●●	●
<b>Nutzwert (Gesamtleistung)</b>		<b>140</b>	<b>130</b>	<b>115</b>	<b>140</b>	<b>95</b>

Legende: ●●● Erfüllt das Kriterium voll ●● Erfüllt das Kriterium bedingt ● Erfüllt das Kriterium kaum

Abbildung 4.3 Nutzwertanalyse (nach VDI 2225) zur Auswahl eines geeigneten Formats für die Bereitstellung der Fügefolge

Unter Abwägung der zuvor genannten Kriterien erscheinen somit die Metasprachen XML sowie AML als geeignete Formate zur Bereitstellung der Fügefolge in einem neutralen Datenformat. In Bezug auf die Anwendungsbreite, speziell im automobilen Umfeld, wird im weiteren Verlauf die Metasprache AML präferiert.

Nachfolgend wird das Archivierungskonzept der Fügefolge sowie die Struktur zur Speicherung der Fügefolge innerhalb des AML Formats genauer betrachtet.

#### 4.1.1.6 Methode zur Archivierung der Fügefolge im Entwicklungsprozess

Die zunehmende Verkürzung der Entwicklungszeit führt zu einem immer stärker ausgeprägten simultanen Entwicklungsprozess zwischen dem Produktentwicklungsbereich und dem Produktionentwicklungsbereich. Die Nutzung von gemeinschaftlich genutzten Datenbanken wächst infolgedessen immer weiter an. Zur Nutzung dieser Datenbanken stellen beide Disziplinen entsprechende Schnittstellen bereit (siehe ① in Abbildung 4.4).

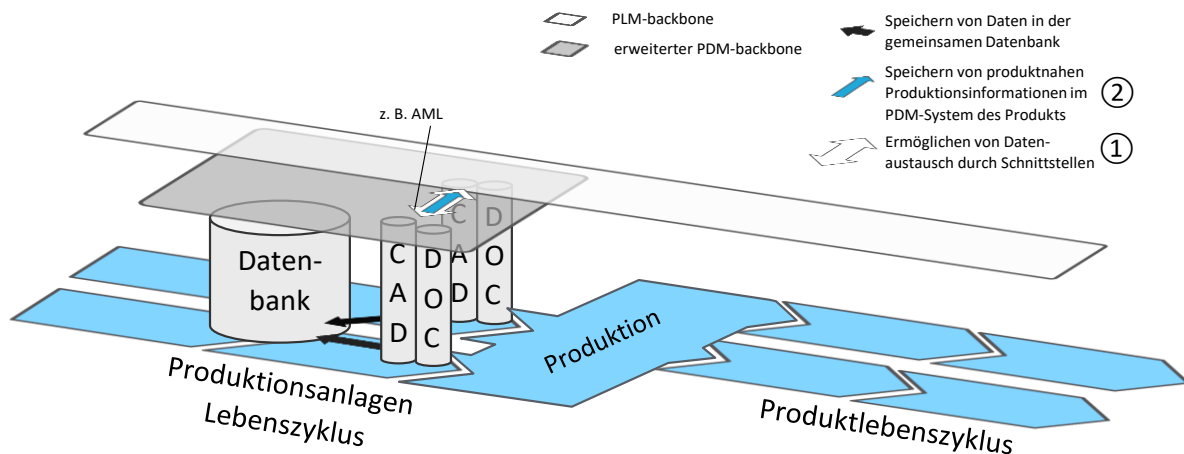


Abbildung 4.4 Domänenübergreifender Ansatz zur Produkt- und Produktionsentwicklung im Kontext des Produkt- sowie Anlagenlebenszyklus [Litw3]

Produktnahe Produktionsdaten müssen aufgrund der starken Abhängigkeit dieser Informationen in Bezug auf das Produkt im PDM-System des Produktes abgelegt werden. So werden beispielsweise im automobilen Umfeld Informationen wie Füge-technik, Fügefolge, Messinformationen im PDM-System archiviert (siehe ② in Abbildung 4.4). Dabei ist ein reibungsloser Datenaustausch zwischen den Domänen sicherzustellen. Das Verschieben der Informationen in andere Domänen erfordert oftmals auch die Modellierung von Entwicklungsinformationen in früheren Phasen des Produkt- bzw. Produktionsentwicklungsprozesses innerhalb der eigentlich entwicklungsfremden Domäne (z. B. Fügefolge, Verbindungstechnik etc.). Dies hat die Erweiterung bestehender Entwicklungssysteme um jene artfremden Informationen zur Folge. Deswegen müssen beispielsweise die Modellierbarkeit der Füge-technik innerhalb des CAD-Systems des Produktes sichergestellt werden oder die Möglichkeit des Aufbaus eines Fügegraphen im PDM-System möglich sein. Zum gegebenen Entwicklungszeitpunkt muss dann eine Versorgung in den entsprechenden Bereichen erfolgen. Der Austausch von domänenübergreifenden Entwicklungsdaten durch Schnittstellen unter Verwendung von standardisierten Austauschformaten erleichtert dabei auch in den Entwicklungsbereichen Toleranzmanagement / Änderungsmanagement ein effizienteres Arbeiten. Die Bereitstellung der Fügefolge in einem digital verwertbaren Format muss daher im PDM-System des Produktes erfolgen.

Um sicherzustellen, dass sämtliche Folgeprozesse die jeweiligen Dokumente nutzen können, ist die Abbildung aller relevanten Informationen erforderlich. Dies wird nachfolgend näher erläutert.

#### 4.1.1.7 Methode zur Darstellung der Fügefolge im AML-Format

Prinzipiell folgt AML dem objektorientierten Ansatz und erlaubt so eine physikalisch, logische Modellierung von Anlagenteilen, die beliebig ineinander verschachtelt werden können. Die Modellierung einer Baumstruktur, wie sie zur Darstellung der Fügefolge benötigt wird, ist möglich; weiterhin können zusätzliche Objekte wie Kinematik, Logikoperationen (Zusammenbausequenz, Bauteilverhalten, Kontrollinformationen etc.) abgebildet werden. Grundsätzlich bedient sich AML an bereits existierenden XML-Formaten und vereint diese unter dem sogenannten Top-Level-Format CAEX IEC 62424. Weitere Bestandteile sind dabei:

- Geometrie und Kinematikformat COLLADA
- Logikformat PLCopen XML
- Beziehungen zwischen AML Objekten sowie Verweise auf Informationen außerhalb des Formates CAEX
- Möglichkeit zur Integration weiterer XML-basierter Formate

Der Aufbau der AML gliedert sich in vier Strukturen (vgl. Abbildung 4.6).

Die Rollenklassenbibliothek beschreibt die Semantik zwischen den verschiedenen Objekten. Im Hinblick auf den Automobilbau bedeutet das, dass hier verschiedene Sichten auf das Projekt hinterlegt werden können (Produktsicht, Prozesssicht, Ressourcensicht). Abbildung 4.5 zeigt eine Gliederung der Sichten, wie sie im weiteren Verlauf auch in der Rollenklassenbibliothek abgebildet sind.

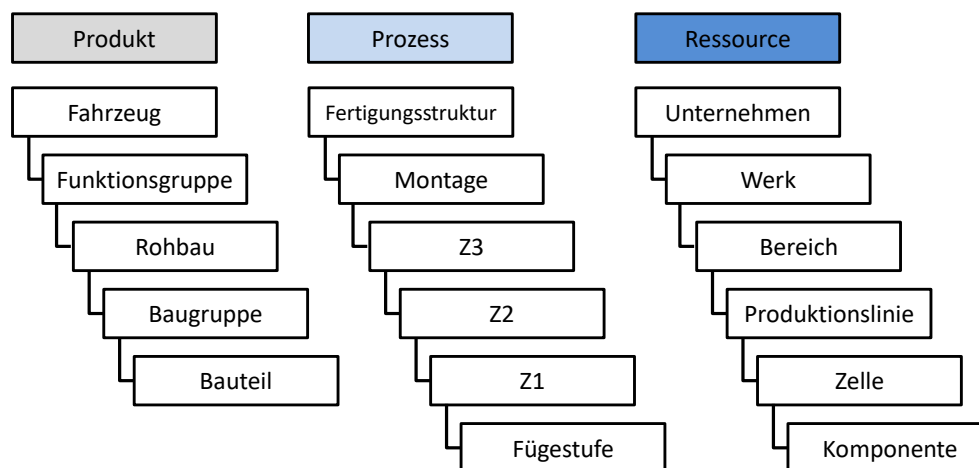


Abbildung 4.5 Sichten (Rollen) im automobilbauumfeld

Die Instanzhierarchie beschreibt die Daten des Projektes an sich. Die Objekte (hier: Fügestufen) innerhalb des Projektes weisen alle dieselbe Rangordnung auf. Zur Abbildung

einer Rangordnung zwischen den Objekten können entsprechende Verbindungen erstellt werden. So lassen sich in Bezug auf die Fügefolge die einzelnen Anlagenteile logisch miteinander verbinden (siehe Abbildung 4.6). Ferner ist es möglich, Schnittstellen aus der Schnittstellenbibliothek zu nutzen, um den Zusammenhang zu expliziten Bauteilen und Baugruppen aus der Systemeinheitsbibliothek herzustellen. Neben Schnittstellen ist für jedes Objekt die Definition einer beliebigen Anzahl an Attributen möglich.

Die Schnittstellenbibliothek wiederum bildet sämtliche verwendeten Verbindungen zwischen den verschiedenen Objekten ab. So lassen sich unterschiedliche Arten von Verbindungen innerhalb des Projektes realisieren.

In der Systemeinheitsbibliothek erfolgt die Definition der wiederverwendbaren Projekteinheiten. In Bezug auf die Fügefolge bedeutet das, dass hier die einzelnen Baugruppen des Produktes nacheinander (mit gleichwertiger Rangordnung) aufgeschlüsselt sind. Auch diese Objekte weisen entsprechende Attribute auf. Durch die Verwendung von Verbindungen lassen sich diese Objekte so innerhalb der Instanzhierarchie in der jeweiligen Fügestufe verarbeiten (Instanzierung). Die mehrfach Verwendung der einzelnen Bauteile oder auch Baugruppen wird damit ermöglicht.

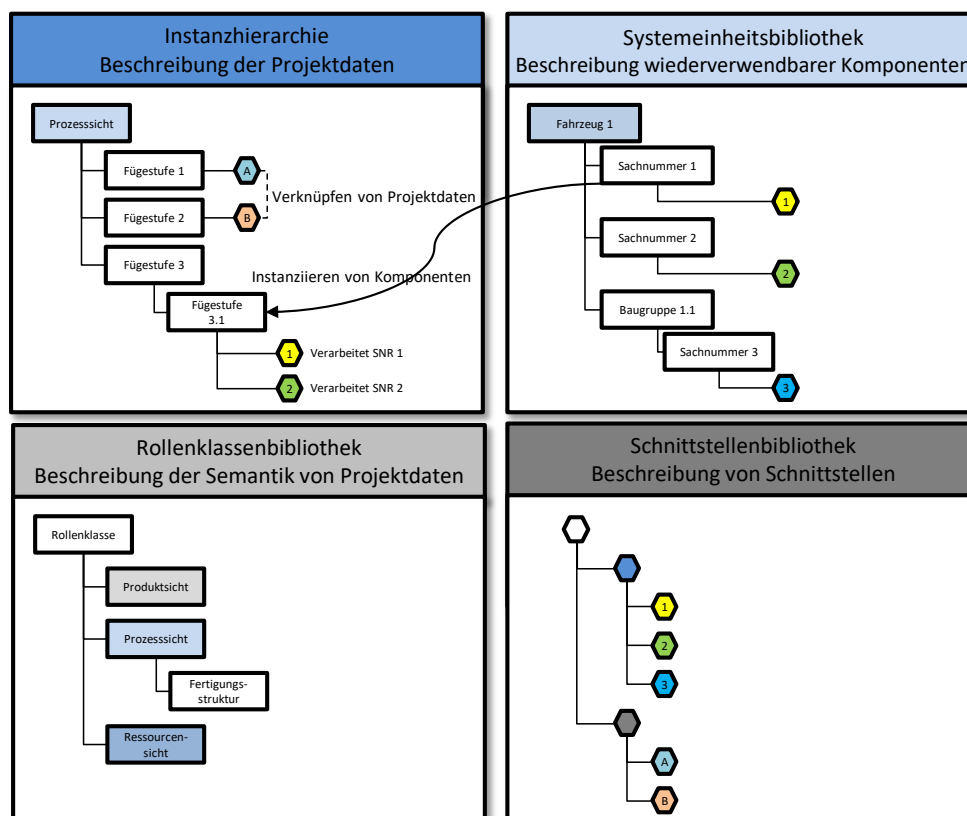


Abbildung 4.6 Topologiebeschreibung der AML in Bezug auf die digitale Fügefolge

Die Verlinkung verschiedener Objekte innerhalb des AML-Dokumentes hilft dabei, die Baumstruktur des Dokumentes selbst für ganze Fahrzeuge auf einem übersichtlichen Niveau zu halten.

Damit kann die Fügefolge im automobilen Umfeld dokumentiert werden; ein Beispiel dazu findet sich in Kapitel 6.2.

#### 4.1.2 Methode zur Bereitstellung von Metadaten im Spann- und Fixierkonzept [Litw3]

Die Bereitstellung von Metadaten des Spann- und Fixierkonzeptes im Datensatz ist unumgänglich. Die dazu erarbeitete Methode wird nachfolgend näher erläutert. Zur Speicherung der Metadaten ist eine Datenstruktur notwendig (wie in Abbildung 4.7 dargestellt). Diese Struktur lässt sich in den gängigen PDM-Systemen generieren. Wie in Kapitel 4.1.1.6 erläutert, sollen die Spann- und Fixiermetadaten im PDM-System des Produktes abgelegt werden.

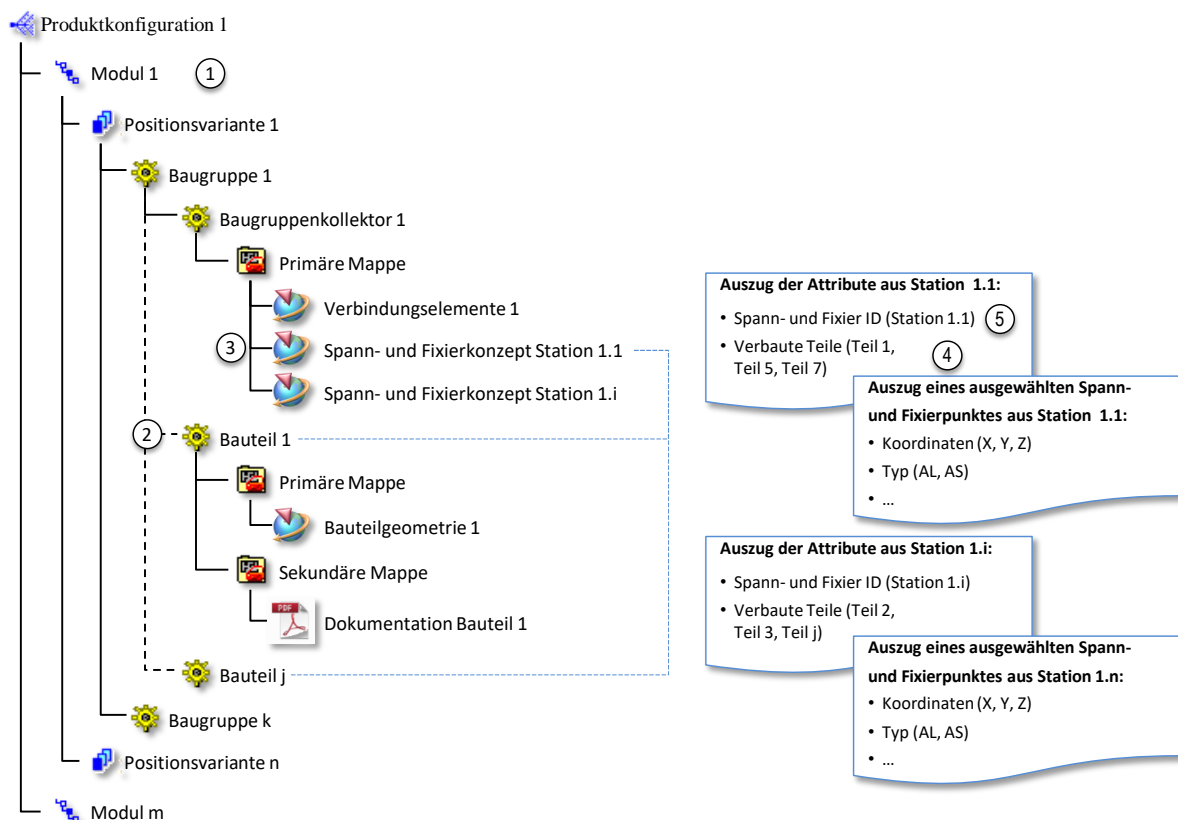


Abbildung 4.7 Erforderliche Metadaten im PDM-System zur Darstellung der Fügefolge

Beispielsweise kann die Speicherung der Spann- und Fixierdaten in einem separaten Datensatz erfolgen, der innerhalb des gültigen Zusammenbaus archiviert wird. Da für verschiedene

Derivate unterschiedliche Spann- und Fixierkonzepte gelten, kann es sein, dass sich innerhalb eines Zusammenbauknotens mehrere Spann- und Fixierkonzepte finden. Selbiges liegt vor, wenn der Zusammenbau einer Baugruppe über mehrere Zusammenbaustationen hinweg erfolgt. Da in Bezug auf die Toleranzsimulation jede Station zu berücksichtigende Abweichungen einbringt, ist die Schaffung einer klaren Zuordnung, welche Spannungspunkte welche Bauteile miteinander verspannen, notwendig, um die Fügeoperation auszuführen. Aus diesem Grund sind innerhalb des CAD-Systems bei der Abbildung der Spanntechnik zusätzliche Attribute anzulegen:

- Name der Spannstation (ID)
- Liste gefügter Bauteile (Bauteilsachnummern)

Für die einzelnen Spannungspunkte können dann die entsprechenden Namen, Typen, Koordinaten und Richtungsvektoren hinterlegt werden. Durch die Produktstruktur des PDM-Systems (flache Baumstruktur der einzelnen Aufbaustufen) sowie die neu angelegten Attribute lässt sich so auch auf den Fügegraphen schließen. Abbildung 4.8 zeigt die Vorgehensweise bei Ableitung des Fügegraphen.

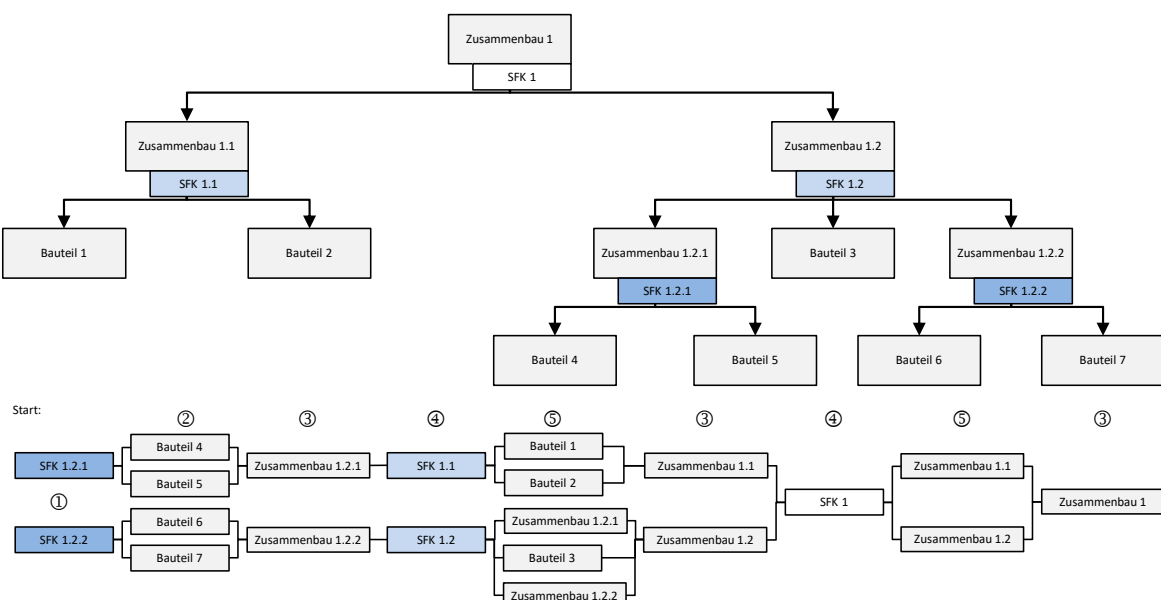


Abbildung 4.8 Konzept zur Ableitung des Fügegraphen basierend auf Spann- und Fixiermetadaten

Zunächst erfolgt das Parsen des Umfangs nach allen Spann- und Fixierkonzepten. Nachfolgend können diese anhand der vergebenen IDs sortiert werden. Die IDs mit den höchsten Rängen stellen dabei Spann- und Fixierumfänge dar, welche die Bauteile der untersten Ebene der Baumstruktur verbinden (siehe ① in Abbildung 4.8). Mithilfe des Attributes „Liste gefügter



Bauteile“ lassen sich somit die Einzelteile finden (siehe ② in Abbildung 4.8). Die Zusammenbauten, welche die Spann- und Fixierkonzepte tragen, bilden die übergeordnete Ebene des Fügegraphen (siehe ③ in Abbildung 4.8). Nachdem so die Spann- und Fixierkonzepte einer Ebene des Fügegraphen den Bauteilen zugeordnet wurden, muss im nächsten Schritt das übergeordnete Spann- und Fixierkonzept gefunden werden. Dieses Spann- und Fixierkonzept (siehe ④ in Abbildung 4.8) beinhaltet in der „Liste der gefügten Bauteile“ die entsprechenden Baugruppen untergeordneter Elemente (siehe ⑤ in Abbildung 4.8). Der Fügegraph des gewählten Umfangs kann so beim wiederholten Durchführen der zuvor erwähnten Schritte aufgebaut werden.

Im nachfolgenden Kapitel werden die in Kapitel 3.1.2 erläuterten durch das Toleranzmanagement verursachten Defizite der Informationskette behoben. Es erfolgt damit die Beantwortung der Forschungsfrage **Information 2** (I2 in Abbildung 4.1).

### **4.1.3 Methode zur Bereitstellung von Qualitätsmerkmalen im PDM System**

Neben der Fügefolge, welche das Rückgrat des Toleranzsimulationsmodelles darstellt, sind auch die Qualitätsmerkmale (Schließmaße der Maßkette) in einem digital verwertbaren Format bereitzustellen. Wie in Kapitel 2.3.5 erwähnt, existieren im Karosserierohbau Fugen- und Übergangsmasse sowie Funktionsmaße, die ein gewisses Maß an Streuung nicht überschreiten dürfen, um optischen und funktionalen Anforderungen gerecht zu werden. Ihre Archivierung wird im nachfolgenden Kapitel ausführlicher beschrieben.

#### **4.1.3.1 Der digitale Funktionsmaßkatalog und der digitale Fugenplan**

Ein Konzept zur Bereitstellung der Funktionsmaße / Fugenmaße in der Entwicklungsdatenbank (PDM-System) steht am Anfang der Betrachtung.

*Hinweis:* Zur besseren Lesbarkeit der Arbeit werden diese Maße (Funktionsmaße und Fugenmaße) nachfolgend unter dem Begriff der Qualitätsmerkmale zusammengefasst.

#### **4.1.3.2 Konzept zur Umsetzung im PDM-System**

Begründet aus der Vielzahl von Qualitätsmerkmalen an einem Karosserierohbau (ca. 1500 Funktionsmaße und 400 Fugenmaße), ist in einem ersten Schritt eine Clusterung dieser Maße vorzunehmen. Die Struktur soll es einem Anwender später ermöglichen, schnell und einfach relevante Qualitätsmerkmale zu finden. Eine performante Navigation innerhalb der Struktur

ist daher unabdingbar. Fehler bei der Eintragung neuer Qualitätsmerkmale sowie in der Visualisierung der Maße gilt es durch das Konzept zu vermeiden. Folgende Sichten können grundsätzlich im PDM-System generiert werden:

- Funktionssicht (eine Datei pro Funktionsmaß / Funktionsgruppe, Fugenmaß / Fugengruppe)
- Produktsicht (eine Datei pro Baugruppe / Aufbaustufe)
- Zentraldokument (eine Datei für alle Funktionsmaße / Funktionsgruppen, Fugenmaße / Fugengruppen)

#### **4.1.3.3 Clusterung nach Funktionssicht**

Informationen, die ein entsprechendes Bauteil betreffen, werden innerhalb eines PDM-Systems oft in einer zugehörigen Datei abgespeichert (z. B. Stammdatenblatt). Folgt man dieser Logik für die entsprechende Funktionsgruppe so ergibt sich die Notwendigkeit, für jede der vorliegenden Funktionen am Rohbau die Existenz eines entsprechenden Bauteils zu gewährleisten. Dieses trägt dann das / die Qualitätsmerkmal(e) der Funktion (Bereitstellung einer Sachnummer pro Funktionsgruppe).

Der Vorteil dieser Darstellung liegt einerseits in der Möglichkeit der sehr schnellen Visualisierung der entsprechenden Funktionen, da die einzelnen Dateien eine relativ überschaubare Datengröße aufweisen. Andererseits ist es durch das Erstellen von Relationen zwischen Bauteilen und Dateien möglich, jedem Qualitätsmerkmal eine eindeutige Toleranzkette zuzuweisen und damit die entsprechenden Teilenummern (Sachnummer) zu hinterlegen. Ferner ermöglicht ein Auftrennen nach Funktionen ein simultanes Arbeiten an den Qualitätsmerkmalen der Baureihe sowie die schrittweise Freigabe entsprechend der Aufbaustufen (Z1-Z3).

Der Nachteil dieser Struktur ist ihre Unübersichtlichkeit. Betrachtet man die zahlreichen Funktionsgruppen am Rohbau, so würde eine solche Struktur zwischen 500 und 1500 einzelne Dateien fordern. Eine Unterscheidung der Dateien, welche die Qualitätsmerkmale der einzelnen Funktionen tragen, ist im PDM-System durch die Benennung möglich. Jedoch fordert die Art der Struktur einen in Bezug auf Änderungen einen extrem hohen Pflegeaufwand.

#### 4.1.3.4 Clusterung nach Produktsicht

Die zweite Möglichkeit der Zergliederung der Qualitätsmerkmale am Rohbau stellt die Produktsicht dar. Für jede übergeordnete Aufbaustufe wird hier eine Datei erstellt (Aufbaustufe Z1, Aufbaustufe Z2.3). Innerhalb dieser Datei erfolgt das Anlegen einer Unterstruktur, in der die jeweiligen Funktionen nach Gruppen nochmals weiter untergliedert werden. In modernen PDM-Systemen erfolgt die Abbildung des Produktes in Form der Produktsicht. Es ist dadurch möglich, die Qualitätsmerkmale direkt in diese Struktur zu integrieren (siehe das Beispiel Funktionsmaßkatalog in Abbildung 4.9). Durch Sachnummern der entsprechenden Aufbaustufen entsteht dabei ein klarer Zusammenhang zwischen den Qualitätsmerkmalen und den Bauteilsachnummern.

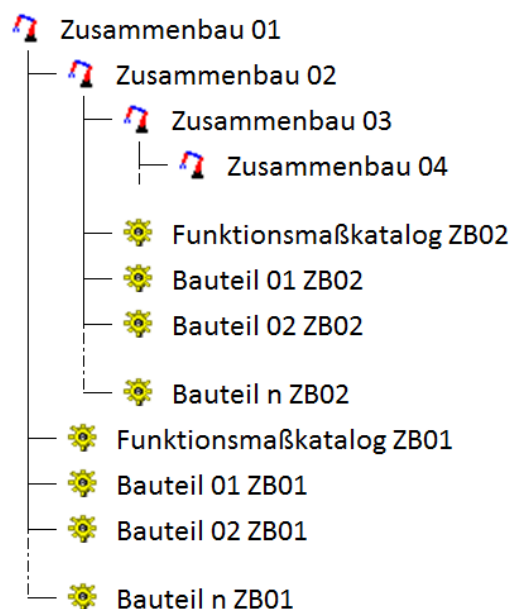


Abbildung 4.9 Funktionsmaßkatalog eingebettet in die Produktstruktur moderner PDM-Systeme

Ein weiterer Vorteil dieser Clusterung liegt in der möglichen Übernahme einzelner Umfänge für andere Produktprojekte. Wird beispielsweise ein Derivat entwickelt, so können einzelne Baugruppen sowie deren zugehörige Qualitätsmerkmaldateien direkt übernommen werden. Lücken in Qualitätsmerkmaldateien durch die Übernahme bestehender Baugruppen sind damit zukünftig ausgeschlossen.

Durch die Aufschlüsselung der Qualitätsmerkmale müssen bei ihrer Visualisierung immer nur die Bauteile der zugehörigen Baugruppe geladen werden. Dies führt zu einer geregelten

Datenmenge, die sich gut verwalten lässt. Zudem ist die Gliederung leicht verständlich, da sie der Produktionslogik folgt.

Ein simultanes Bearbeiten der Qualitätsmerkmalsdateien ist analog der Gliederung nach Funktionsgruppen-Logik möglich. Die Reduzierung der Dateien gegenüber dem Funktionsgruppen Konzept führt zudem zu einer bedeutenden Erleichterung beim Datenhandling.

#### **4.1.3.5 Verwaltung durch ein Zentraldokument**

Die dritte Möglichkeit der Gliederung der Qualitätsmerkmale ist die Bereitstellung einer Zentraldatei. Hierbei existiert nur eine Sachnummer, welche sämtliche Qualitätsmerkmale eines Projektes beinhaltet.

Die Zuordnung der relevanten Bauteile zu jedem Qualitätsmerkmal erfolgt innerhalb einer einzigen Datei. Das Auffinden von Informationen wird durch dieses Einquellenprinzip deutlich vereinfacht. Ein weiterer Vorteil dieser Gliederung ist außerdem die relativ einfache Verwaltung der Qualitätsmerkmale, da der Wechsel zwischen verschiedenen Sachnummern wie beim Funktionsgruppenprinzip entfällt. Zudem hat das Einquellenprinzip auch in Bezug auf Änderungen deutliche Vorzüge, da nur die betreffende Sachnummer den Freigabeprozess innerhalb des PDM-Systems durchlaufen muss.

#### **4.1.3.6 Beurteilung der verschiedenen Strukturkonzepte mithilfe einer Nutzwertanalyse**

Zur Auswahl eines geeigneten Strukturkonzeptes erfolgt die Durchführung einer Nutzwertanalyse nach VDI-Richtlinie 2225.

#### **4.1.3.7 Auswahl für eines geeigneten Strukturkonzepts zur Bereitstellung eines digitalen Funktionsmaßkatalogs bzw. Fugen- und Radienplans**

Beim Vergleich und der Bewertung der verschiedenen Strukturkonzepte werden die nachfolgenden Kriterien herangezogen, die mittels der intuitiven Methode Brain Storming nach VDI-Richtlinie 2225 herausgearbeitet worden sind.

- Datenperformance:

Die Datenperformance beschreibt die Leistung beim Umgang mit den Daten, welche die Qualitätsmerkmale beinhalten sowie davon betroffene Daten wie auch

entsprechende Bauteilumfänge. Die Schwerpunkte liegen dabei auf dem Laden der Umfänge im PDM- und CAD-System sowie der Visualisierung der Qualitätsmerkmale.

- rechnergestützte Auswertbarkeit:

Die Qualitätsmerkmale müssen sich im Hinblick auf die Erstellung von Toleranzsimulationsmodellen rechnergestützt weiter verarbeiten lassen. Zudem ist es notwendig, die betreffenden Schließmaße für weitere Analysen bereitzustellen; z. B. das Auffinden von funktionalen Überschneidungen mehrerer Toleranzketten. [Litw8]

- Zeitaufwand bei der Erstellung der Qualitätsmerkmalsdatei(en):

Aufgrund von Zeit- und Kostendruck muss der Aufwand bei der Erstellung der Qualitätsmerkmalsdatei(en) durch den Nutzer möglichst gering sein.

- Rechtemanagement:

Zur Bereitstellung der jeweils relevanten Qualitätsmerkmale für Dritte (auch externe Zulieferer) ist ein Rechtemanagement unabdingbar. Nur so kann sichergestellt werden, dass die jeweils richtigen Informationen an die betroffenen Personen weitergeleitet werden. Das Rechtemanagement des PDM-Systems und das Konzept zur Bereitstellung digitaler Qualitätsmerkmale dürfen durch CAD-interne Verknüpfungen von Daten nicht ausgehebelt werden.

- Prozesssicherheit:

Die breite Anwenderschaft von Qualitätsmerkmalen (Toleranzmanagement, Anlauffabrik, Audit, Qualitätssicherung etc.) erfordert die Gewährleistung sowohl der Visualisierung und als auch der Möglichkeit des Eintragens von Qualitätsmerkmalen. Dies muss für alle Produkte und zu jedem Entwicklungsstand funktionieren.

- Standardisierung:

Produktübergreifende und wiederkehrende Merkmale (z. B. an Derivaten) müssen archiviert werden, damit die einfache Bereitstellung der Qualitätsmerkmale für neue Produkte sichergestellt werden kann. Dies vereinfacht und verkürzt die Entwicklung.

- simultanes Arbeiten:

Das simultane Erstellen von Qualitätsmerkmalen verschiedener Funktionsgruppen durch mehrere Anwender soll durch das Strukturkonzept unterstützt werden.

- Visualisierung außerhalb des CAD-Systems

Eine Visualisierung der Qualitätsmerkmale im PDM-System ist zur reibungslosen Nutzung der Informationen für Folgeprozesse notwendig.

- Bereitstellung der Informationen für Vergabeumfänge an Dritte:  
Das Konzept soll das Herauslösen von Teilfunktionsgruppen aus dem Gesamtumfang ermöglichen. So können diese Umfänge von Dritten bearbeitet und abgesichert werden. Die Möglichkeit einer reibungslose Rückführung der fertig bearbeiteten Umfänge ist dabei unabdingbar.

#### 4.1.3.8 Gewichtung der Kriterien

Die Bewertung der angeführten Konzepte erfolgt erneut anhand des Auswahlverfahrens nach Pugh [Luna] unter Zuhilfenahme der AHP-Kontingenztafel.

Die höchste Gewichtung (10-7) bei der Auswahl eines geeigneten Strukturkonzeptes zur Bereitstellung von digitalen Qualitätsmerkmalen erhalten folgende Kriterien:

- Datenperformance, Zeitaufwand bei der Erstellung von digitalen Qualitätsmerkmalen:  
Bei einer guten Datenperformance der Qualitätsmerkmalsdateien, d.h. bei schnellen Ladezeiten vom PDM ins CAD-System sowie einer schnellen Datenvisualisierung innerhalb der Umgebungen, ist davon auszugehen, dass eine breite Akzeptanz seitens der Datennutzer sowie der Datenersteller vorliegt. Die einfache und schnelle Erstellung der Qualitätsmerkmale innerhalb der Systeme trägt dazu wesentlich bei.
- rechnergestützte Auswertbarkeit  
Die Möglichkeit der digitalen Verarbeitung von Qualitätsmerkmalen in Folgeprozessen ist entscheidend für den Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen. Das Qualitätsmerkmal stellt hier das Zielmaß der Simulation dar.

Die folgenden Kriterien bei Bewertung der Strukturkonzepte erscheinen dagegen weniger wichtig und werden daher geringer gewichtet (Gewichtung 6-1):

- Prozesssicherheit:  
Ein prozesssicherer Ablauf beim Eintragen sowie beim Visualisieren von Qualitätsmerkmalen trägt zur Erhöhung der Akzeptanz bei. Eine systeminterne Konsistenzprüfung bei der Eintragung neuer Qualitätsmerkmale führt zur Fehlerminimierung und ist somit dem Reifegrad dienlich.
- Standardisierung:

Die steigende Anzahl an Derivaten eines Produktes fordert die Standardisierung der Qualitätsmerkmale innerhalb verschiedener Funktionsgruppen. Nur so können Baugruppen und baureihenübergreifende Konzepte realisiert werden.

- Rechtemanagement, Bereitstellung der Informationen für Vergabeumfänge an Dritte, simultanes Arbeiten:

Liegen dem Strukturkonzept und dem PDM-System das identische Rechtemanagement zugrunde, so lassen sich problemlos abgeschlossene Umfänge an Dritte (z. B. Zulieferer) zur Bearbeitung abgeben. Das erlaubt zudem die stückweise parallele Erstellung von Qualitätsmerkmalen durch verschiedene Anwender.

#### 4.1.3.9 Bewertung der Strukturkonzepte zur Bereitstellung digitaler Qualitätsmerkmale

Kriterien	Gewichtung	Bewertung			
		Variante 1 Funktions- gruppen	Variante 2 Produktsicht	Variante 3 Zentraldatei	Ausgangs- situation
Datenperformance	9	●●●	●●	●	●●
Zeitaufwand bei der Erstellung	8	●	●●	●●●	●●
Rechnergestützte Auswertbarkeit	8	●●●	●●●	●●●	●●
Prozesssicherheit	3	●●	●●●	●●●	●●
Standardisierung	3	●●●	●●●	●●●	●●
Rechtemanagement, Bereitstellung der Information für Vergaben	6	●●●	●●●	●●	●●
<b>Nutzwert (Gesamtleistung)</b>		<b>92</b>	<b>94</b>	<b>87</b>	<b>74</b>

Legende: ●●● Erfüllt das Kriterium voll    ●● Erfüllt das Kriterium bedingt    ● Erfüllt das Kriterium kaum

Abbildung 4.10 Nutzwertanalyse der Strukturkonzepte zur Bereitstellung von Qualitätsmerkmalen im digitalen Format

Abbildung 4.10 zeigt die Ergebnisse der Nutzwertanalyse zur Bewertung der Strukturkonzepte digitaler Qualitätsmerkmale gemäß der zuvor definierten Kriterien. Zudem kann man aus der Abbildung der Nutzen des ursprünglichen Konzeptes zum Funktionsmaßkatalogs / Fugen- und Radienplan (PowerPoint) erschlossen werden. Auffällig ist die sehr gute Datenperformance

der ersten Variante (Gliederung nach Funktionsgruppen). Dies liegt je Funktionsgruppe an den weitgehend leicht überschaubaren Relationen zwischen den einzelnen Qualitätsmerkmalen und den Bauteilen (Sachnummern). Dadurch sind sehr schnelle Ladezeiten und eine gute Performance bei der Visualisierung möglich. Der Zeitaufwand bei der Erstellung von Qualitätsmerkmalen verhält sich dagegen reziprok. Die hohe Anzahl an Funktionsgruppen und damit an einzelnen Sachnummern fordert einen hohen Aufwand bei der Erstellung und der Einarbeitung von Änderungen. Allerdings lassen sich alle drei möglichen Strukturkonzepte sehr gut rechnergestützt auswerten. Aufgrund der hohen Anzahl an Funktionsgruppen erscheint Variante 1 jedoch in Bezug auf die Prozesssicherheit weniger geeignet, da hier nur über eine eindeutige Benennung sichergestellt werden kann, dass Folgeprozesse die erforderlichen Informationen auch finden können. Die Bereitstellung der Informationen für Dritte (z. B. Zulieferer) erscheint dagegen bei Variante 3, der Zentraldatei, schwierig. Hier lassen sich nur aufwändig Teilumfänge zur Bearbeitung herauslösen. Im Vergleich zur Ausgangssituation erscheint nach Auswertung der Nutzwertanalyse Variante 2, die Strukturierung der Qualitätsmerkmale nach Produktsicht, zielführend. Deswegen wird sie im weiteren Verlauf detailliert betrachtet. Neben der reinen Strukturierung soll im Folgenden auch die Methode zur Generierung von Qualitätsmerkmalen im CAD-System näher erläutert werden.

#### **4.1.3.10 Methodische Umsetzung in der CAD-Umgebung**

Zur Erstellung von Qualitätsmerkmalen sind innerhalb des CAD-Systems mehrere Schritte notwendig (siehe auch Abbildung 4.11).

Im ersten Schritt werden die bauteilinternen Strukturknoten angelegt. So müssen Container zur definierten Speicherung der entsprechenden Features entworfen werden. Zudem erfordern die einzelnen Funktionsgruppen entsprechende Layers / Groups, um die Übersichtlichkeit der Qualitätsmerkmale sicherzustellen.

Als nächstes erfolgt das Kopieren von Bauteilreferenzen in die entsprechende Qualitätsmerkmalsdatei. Es werden also sämtliche zur Qualitätsmerkmalerstellung notwendige Geometrien über CAD-Links in das Bauteil kopiert. Dazu bieten moderne CAD-Systeme grundsätzlich zwei Optionen an. Entweder kann die Geometrie vom Quellbauteil in das Zielbauteil geschoben werden (Push-Link) oder die Geometrie des Quellbauteils wird vom Zielbauteil aus angezogen (Pull-Link). Beide Linkoptionen führen zum selben Ergebnis,



unterscheiden sich allerdings in der Art ihrer Ausführung. Bei Push-Links erfolgt das Arbeiten aus dem Quellbauteil, beim Pull-Link aus dem Zielbauteil heraus. Da die Erstellung der Qualitätsmerkmale aus der Qualitätsmerkmaldatei erfolgen soll, werden Referenzgeometrien durch den Pull-Link erzeugt. Die geometrische Assoziativität kann innerhalb des Links gespeichert werden, sodass bei Änderungen am Quellbauteil auch das Zielbauteil die entsprechende Änderung erfährt. Eine weitere wichtige Option stellt die Positionsunabhängigkeit der verlinkten Geometrie dar. Bei positionsunabhängigen Links werden alle Verschiebungen des Bauteiles ignoriert, die im Kontext eines Zusammenbaus durchgeführt werden. Neben der Speicherung der Verknüpfung im CAD-System erfolgt in modernen PDM-Systemen auch eine Verarbeitung des Links, sodass eine Beziehung zwischen den beiden Bauteilen entsteht. Sollte die Produktstruktur aufgrund von Überarbeitungen abgeändert werden, bleibt diese Beziehung weiterhin bestehen.

Nachdem die relevanten Geometrien (z. B. Punkte, Linien, Flächen, Koordinatensysteme) zur Erstellung der Qualitätsmerkmale in ein Bauteil eingebracht worden sind, ist es möglich; darauf aufbauende notwendige Hilfsgeometrie zur normgerechten und assoziativen Erstellung des eigentlichen Toleranzrahmens zu generieren. Diese Features können dann in den zuvor angelegten Containern archiviert werden.

Abschließend lässt sich so an den Hilfsgeometrien ein normgerechter sowie geometrisch assoziativer (updatestabiler) Toleranzrahmen verankern, der ein Qualitätsmerkmal repräsentiert.

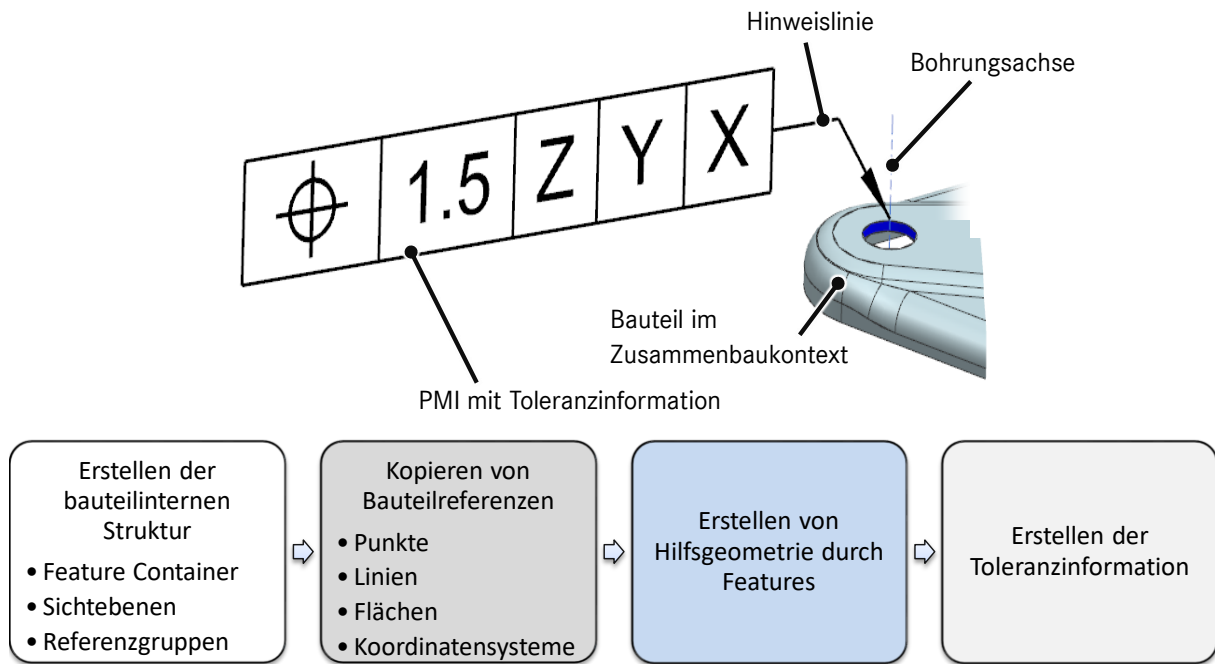


Abbildung 4.11 Methode zur Erstellung von Qualitätsmerkmalen

Erfolgt im Laufe des Produktentwicklungsprozesses eine Änderung der Bauteilgeometrien zwischen / an denen Qualitätsmerkmale aufgespannt / verankert sind, so ist durch ein simples Update des Qualitätsmerkmalbauteils sichergestellt, dass auch das Qualitätsmerkmal und dessen Unterbestandteile (Hilfsgeometrie, Bauteilreferenzen d. h. CAD-Links) diese Änderungen erfahren. Somit lassen sich Änderungen prozesssicher ohne erheblichen Zeitaufwand einarbeiten.

Ein weiterer Vorteil dieser Methode stellt das Arbeiten mit einfachsten CAD-Geometrien (Punkte, Linien, Teilflächen, Koordinatensysteme) dar. Das Verlinken dieser simplen Referenzgeometrien führt zu sehr geringen Datenmengen des Qualitätsmerkmalbauteils, was sich in einer sehr guten Performance beim Arbeiten mit diesen Daten niederschlägt.

Zudem lassen sich mit einem vorhandenen Qualitätsmerkmalbauteil, ohne Zugriff auf weitere Produktdaten (d. h. Quellbauteile der CAD-Links), sehr wenig Information auslesen. Das Rechtekmanagement des PDM-Systems kann damit vollumfänglich angewendet werden.

Ein Beispiel der methodischen Umsetzung in CAD- sowie PDM-System findet sich in Kapitel 6.3.

#### 4.1.3.11 Methode zur automatisierten Erstellung von Messspezifikation im Datensatz

Die Methode der automatisierten Erstellung von Messspezifikation im Datensatz bedient sich der im Produktentwicklungsprozess zuvor definierter Masterschnitte (vgl. Kapitel 2.3.5.1). Diese Messschnitte sind bereits gewerkeübergreifend abgestimmt und als einfache Schnittebenen im PDM-System archiviert. Abbildung 4.12 zeigt einen Auszug eines solchen Schnittmodells innerhalb des Fahrzeugentwicklungsprozesses.

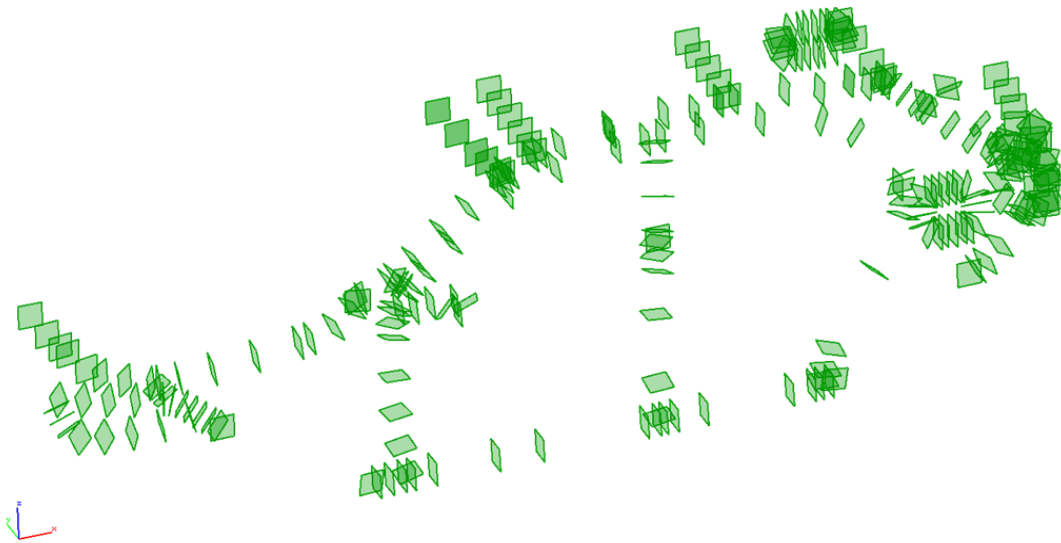


Abbildung 4.12 Schnittmodell eines Fahrzeugs

Bei der Definition dieser Schnitte wird bereits die Größe der Schnittebene so festgelegt, dass sie die zum Audit relevanten Bauteile schneidet. Auch die Benennung der Schnittebenen spiegelt die schnittrelevanten Bauteile wider. Exemplarisch sei hier ein Schnitt zwischen Motorhaube und Kotflügel eines Fahrzeugs genannt. Im Fugen- und Radienplan trägt dieser Schnitt den Namen „7-8 Kotflügel/Motorhaube“. Wird ein Fahrzeugdatensatz zur Erstellung der Messspezifikation dieses Schnittes geschnitten, so entstehen neben Schnittlinien nur Schnittpunkte an Körperkanten und Lichtkanten der Bauteile 7 „Kotflügel“ und 8 „Motorhaube“. Zudem beschränken sich die entstandenen Schnittlinien und -punkte auf die Größe der Messschnittebene. Als Messpunkte müssen im weiteren Verlauf Schnittpunkte ausgewählt werden zur Messung von Fugen- und Versatzmaßen.

Zur Messung des Versatzes eignen sich Schnittpunkte, die zwischen den Bauteilen einen möglichst geringen Abstand aufweisen und deren Richtungsvektoren annähernd in dieselbe Richtung zeigen (siehe Versatz in Abbildung 4.13). Finden sich für eine Bauteilpaarung keine

geeigneten Punkte, so kann keine geometrisch sinnvolle Versatzmessung erfolgen (siehe Abbildung 2.36 rechts).

Die Messpunkte der Fugenmaße bilden Schnittpunkte, deren Richtungsvektoren gegenläufig stehen. Außerdem muss der Abstand der gefundenen Punkte zu deren Versatzmesspunkt (falls vorhanden) einen möglichst geringen Wert aufweisen. Weiterhin müssen auch die Distanzen zwischen den gefundenen Punkten von Bauteil zu Bauteil möglichst klein sein (siehe Fuge in Abbildung 4.13).

Werden hier für ein Bauteil keine geeigneten Punkte gefunden, so erfolgt die Berechnung des kürzesten Abstands der Schnittpunkte eines Bauteils zur Schnittlinie des anderen Bauteils. Ist dadurch ein geeigneter Punkt gefunden, so kann mithilfe einer Projektion ein Messpunkt am gegenüberliegenden Bauteil (auf der Schnittlinie) erstellt werden. Abbildung 4.13 zeigt die oben beschriebenen Fälle.

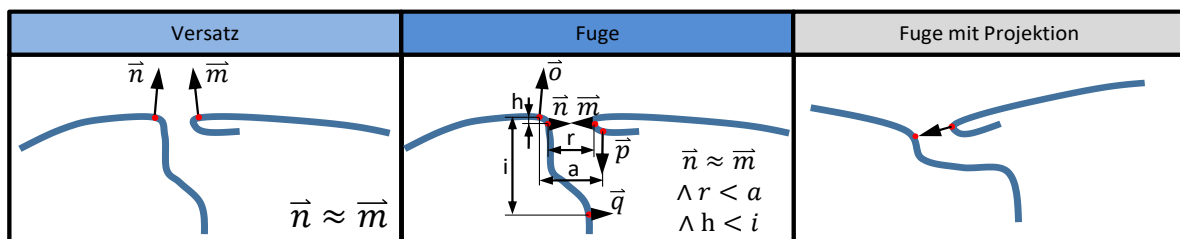


Abbildung 4.13 Definition von Messpunkten aus Schnittpunkten der Messschnitte und deren Bauteilen

Sollen Mess- und Antaststrategien wie in Kapitel 2.2.8.2 beschrieben Anwendung finden (z. B. 4mm Regel), so kann unter Zuhilfenahme der Schnittlinie eine entsprechende lineare Verschiebung der Messpunkte entlang dieser Linie erfolgen.

## 4.2 Methodischer Ansatz zur Umsetzung der Verbesserungspotenziale für effizientes Toleranzmanagement

Die notwendigen Informationen zum Aufbau der Toleranzsimulationsmodelle liegen im PDM- sowie CAD-System nach Umsetzung der zuvor beschriebenen Verbesserungspotenziale vollständig vor. Im nächsten Schritt müssen diese Informationen in das entsprechende Toleranzanalysetool übertragen werden. Zur Definition der erforderlichen Schnittstellen können die in Kapitel 2.1.6 beschriebenen Prozessmodellierungsmodelle verwendet werden. Im folgenden Kapitel wird die Forschungsfrage **Method 1** (M1 in Abbildung 4.1) beantwortet.

### **4.2.1 Methode zur Kopplung von PDM- / CAD-System an ein Toleranzanalysetool nach [Litw4]**

Zunächst erfolgt die Ausarbeitung eines Schnittstellenkonzepts zwischen dem PDM- / CAD-System und der Toleranzanalysesoftware. Anschließend erfolgt die Herleitung der Zusammenhänge und Abhängigkeiten der verschiedenen im Produktentwicklungsprozess anfallenden Informationen, welche zum Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen benötigt werden. Damit erfolgt in diesem Kapitel die Zusammenführung der Information und Prozessen im Produktentwicklungsprozess im Hinblick auf das Toleranzmanagement, welche im Stand der Technik definiert wurden. Weiterhin erfolgt aus Sicht der Produktentwicklung die Erarbeitung von Vorgaben, die ein neutrales Austauschformat erfüllen muss. Ebenso müssen die Abhängigkeiten der Informationen im Toleranzanalysetool veranschaulicht werden, um schlussendlich aufzeigen zu können, welche Ansprüche ein neutrales Austauschformat erfüllen muss.

#### **4.2.1.1 Schnittstellenkonzept zwischen dem PDM- / CAD-System und der Toleranzanalysesoftware**

Zur Gewährleistung der Funktion des Konzepts ist es notwendig, Produktentwicklungsdaten sowie Produktionsentwicklungsdaten aus einem bestehenden PDM- / CAD-System auszulesen. Damit das Auslesen nicht manuell erfolgen muss, besitzen moderne CAD-Systeme Schnittstellen zur internen und externen Anwendungsprogrammierung (APIs). Dabei wird zwischen funktionsorientierten, datenorientierten, objektorientierten und protokollorientierten Schnittstellen unterschieden. Moderne CAD-Systeme arbeiten so weit wie möglich mit objektorientierten Programmierschnittstellen. In einer entsprechenden Typenbibliothek wird oftmals mit Hilfe eines standardisierten Kommunikationsschlüssels der Zugriff auf die öffentlich zugänglichen Datenstrukturen (Klassengerüst) und Unterprogramme dokumentiert. Häufig existiert diese Typenbibliothek für verschiedene Implementierungssprachen. Damit lassen sich die für die jeweilige Entwicklungsumgebung benötigten Informationen automatisiert auslesen. Ferner müssen die so strukturierten Informationen abgespeichert und in einem neutralen Format in eine Toleranzsimulationssoftware eingelesen werden. Die Simulationssoftware muss dazu eine entsprechende Schnittstelle zum Einlesen bereitstellen. Zudem muss die korrekte interne Datenzuordnung über Algorithmen sichergestellt werden. Im Fall, dass die Simulation im

Hintergrund (Batch) durchgeführt werden soll, ist eine eigene Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung (API) erforderlich.

Die Vorgaben, welche zur Erstellung eines softwareunabhängigen Formats notwendig sind, müssen nachfolgend genauer erläutert werden.

#### **4.2.1.2 Interdependenzen der Informationen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses**

Aus Sicht des Produkt- und des Produktionsentwicklungsprozesses gibt es Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Informationen. Exemplarisch wird dies anhand des Entwicklungsprozesses des Karosserierohbaus aufgezeigt (siehe Abbildung 4.14).

Zunächst wird vom Gewerk Design das grundsätzliche Erscheinungsbild eines neuen Fahrzeugs festgelegt. Diese Festlegung erfolgt mithilfe von CAD-Modellen sowie anhand realer Tonmodelle. Dabei werden im Fugen- und Radienplan die Grenzen festgehalten, innerhalb welcher sich beispielsweise Spaltmaße bewegen dürfen. Der Fugen- und Radienplan bildet eine Vorgabe, aus der sich Spezifikationsgrenzen für Messungen ableiten lassen. Eine weitere Vorgabe an das Audit geht vom Funktionsmaßkatalog des Rohbaus aus.

Durch ein optisches Abscannen der Tonmodelle entstehen erste verwertbare CAD-Daten der Fahrzeughülle. Diese Informationen werden an die Konstruktionsabteilung weitergegeben. Daraufhin kann mit der schrittweisen Konstruktion der darunterliegenden Fahrzeugstruktur begonnen werden. Hier wird von außen nach innen vorgegangen. Während der Entstehung der inneren Fahrzeugstruktur erfolgt parallel die erste Festlegung, wie sich die verschiedenen Bauteile miteinander in der Anlage fügen lassen.

Die Fügefolge beschreibt die Reihenfolge der Verbindung der verschiedenen Einzelteile des Rohbaus (vom Gesamtfahrzeug bis hin zum Einzelteil).

Sobald die Fügefolge steht, kann mit der Erstellung des Spann- und Fixierkonzepts begonnen werden. Dieses beschreibt die Positionierung der Bauteile in der Anlage sowie das Spannen der Bauteile zum Verbinden in der jeweiligen Montagestation. Es enthält also die exakten Koordinaten der Spannpunkte. Vom grundlegenden Spann- und Fixierkonzept werden viele weitere Prozessdaten abgeleitet.

Sind die Positionen der Spann- und Fixierpunkte bekannt, so lassen sich die einzelnen Fügepunkte erstellen. Beispielsweise kann Schweißen durch die Schweißzange nur zwischen zwei Spann- und Fixierpunkten erfolgen.

Spann- und Fixierpunkte müssen an Stellen liegen, an denen die Deformation der Bauteile während des Montageprozesses in der Anlage ein Minimum ist. Die Wahl der Bezugsstellen erfolgt unter Berücksichtigung der Gesichtspunkte der Prozesssicherheit, der Formstabilität sowie der Verschleißsicherheit [Bohn, Hets]. Damit entsprechen die Bezugsstellen fast immer den Spann- und Fixierpunkten. Zudem erfolgt eine Vererbung der Bezugsstellen vom Zusammenbau hin zu den Einzelteilen. Nachdem die Bezugssysteme stehen und die Fügefolge bekannt ist, lassen sich Bauteilflächen finden, die eine Tolerierung benötigen.

Beim Einrichten der Messmaschine orientiert sich die Messtechnik auch an den Bauteilpositionen, welche eine geringe Abweichung zum Sollmaß aufweisen. Deshalb finden sich Messschnitte bevorzugt an Orten, die auch Bezüge tragen (vgl. Kapitel 2.3.3.3). Außerdem werden an sämtlichen Positionen des Fugen- und Radienplans Messschnitte erstellt.

Basierend auf einem Messschnitt lassen sich Messpunkte positionieren. Diese tragen zum Teil Spezifikationsgrenzen aus dem Fugen- und Radienplan und werden nach Vorgaben der Messtechnik am Bauteil generiert.

Der Aufbau eines Toleranzsimulationsmodells erfolgt schlussendlich auf der Grundlage all dieser Informationen.

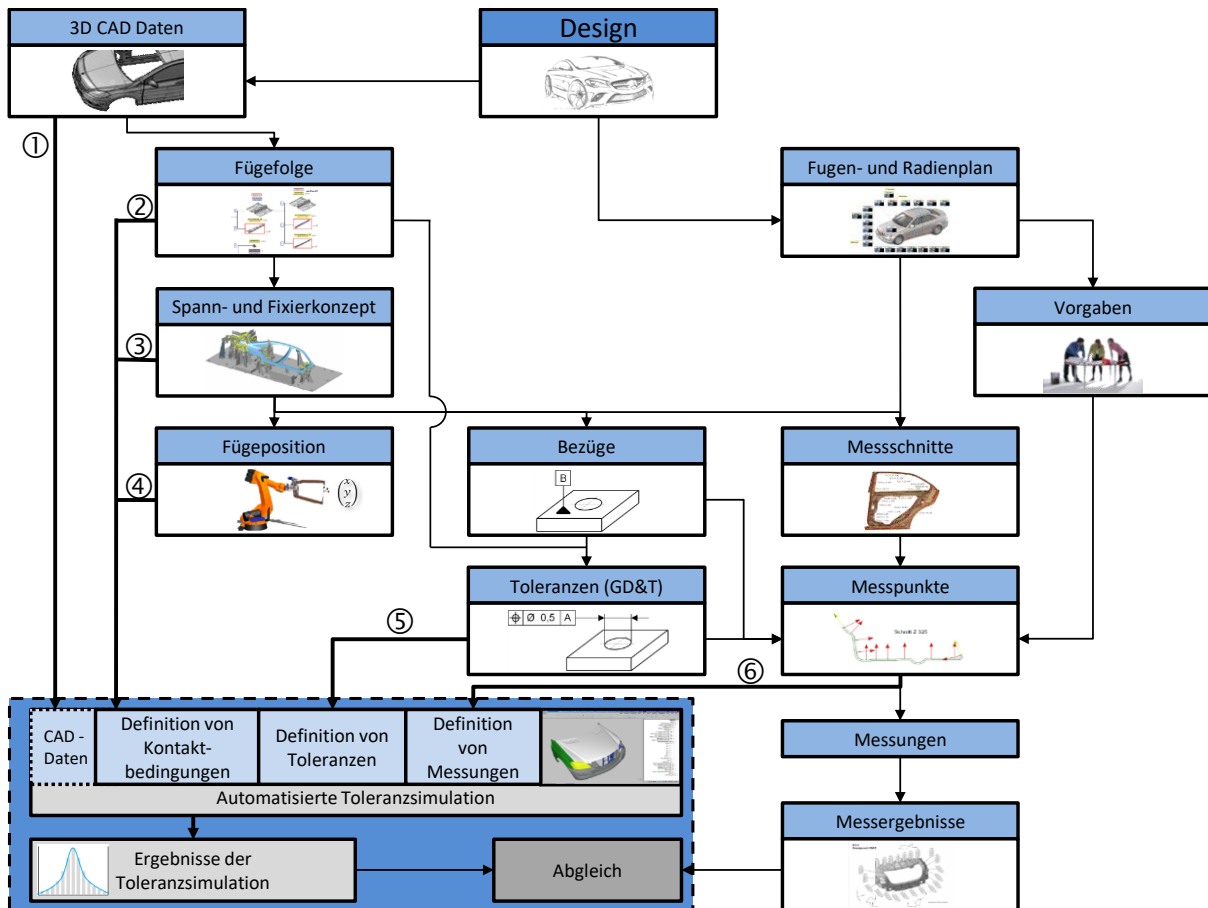


Abbildung 4.14 Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den Produkt- und Produktionsentwicklungsdaten

#### 4.2.1.3 Abgeleitete Vorgaben an das neutral Austauschformat (aus Entwicklungssicht)

Diese Zusammenhänge ermöglichen die in Abbildung 4.15 dargestellte Strukturierung des neutralen Austauschformats aus Sicht der Produkt- und Produktionsentwicklung.

Zunächst muss die gewurzelte Baumstruktur abgebildet werden, welche später der Fügefolge entspricht. Die Struktur der Datenquelle (AML), die diese Baumstruktur zur Verfügung stellt, findet sich in Kapitel 6.2. Durch die endliche Anzahl an Bauteilen eines Produktes weist diese Baumstruktur eine endliche Tiefe auf. Zur Abbildung im neutralen Austauschformat reicht es also, eine gewisse Anzahl an Attributen wie Baugruppenname, Bauteil, Elternbeziehung, Kindbeziehung sowie die Einlegreihenfolge bereitzustellen (siehe auch Abbildung 4.15). Die beiden Attribute Elternbeziehung sowie Kindbeziehung sind wiederum in der Lage, mehrere Instanzen der Objekte Baugruppe sowie Bauteile zu besitzen. Dadurch ist eine gewurzelte Baumstruktur möglich.



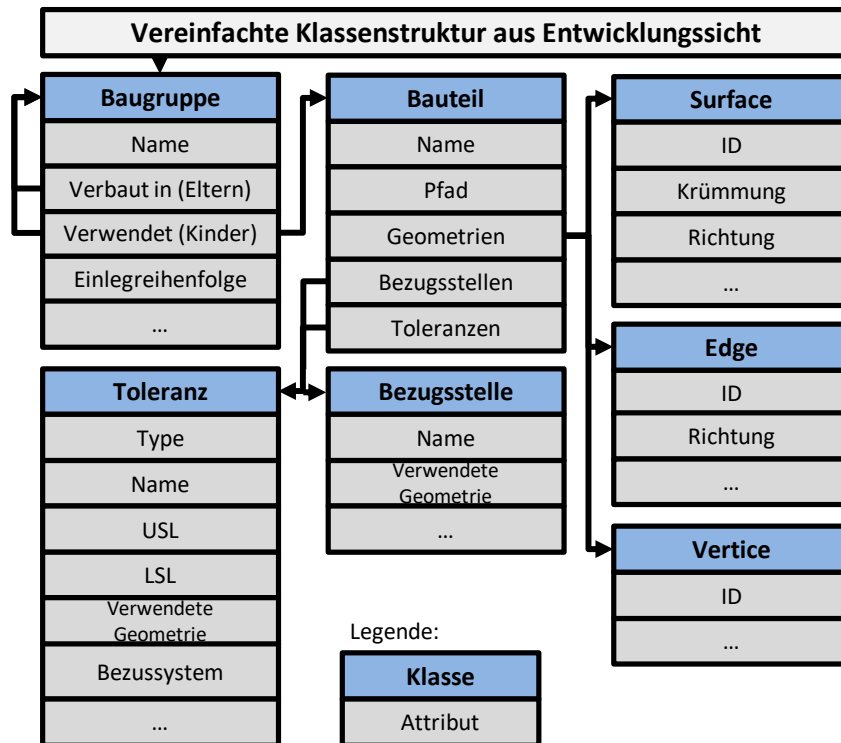


Abbildung 4.15 Klassengerüst aus Sicht der Produkt- und Produktionsentwicklung zum Informationsaustausch mit der Toleranzsimulationssoftware

Die Klasse Bauteil enthält Attribute wie Bauteilname, Pfad (Verweis auf die eigentliche CAD-Geometrie), Geometrien (bauteilbeschreibende Geometrie), Bezugsstellen und Toleranzen. Die exakte Geometrie wird bei einer punktbasierten Toleranzsimulation nicht benötigt; hilft allerdings bei der späteren Interpretation der Ergebnisse.

Das Attribut Geometrien ist in der Lage, mehrere andere Instanzen der Klassen Surface, Edge oder Vertice zu beinhalten, wobei diese Klassen durch Attribute wie ID, Krümmung oder Richtung spezifiziert werden. Ebenso verhält es sich mit den Attributen Bezugsstellen und Toleranzen.

#### 4.2.1.4 Abhängigkeiten der Informationen in der CAT-Software

Auch von Seiten der CAT-Software gibt es Abhängigkeiten und Zusammenhänge der Informationen, die es zu beachten gilt. Abbildung 4.16 zeigt den Standardablauf beim Aufbau eines Toleranzsimulationsmodells nach [VSA].

Zu Beginn des Modellaufbaus erfolgt das Einlesen der simulationsrelevanten Umfänge (siehe 1 in Abbildung 4.16). Wie bereits erwähnt, ist die exakte Geometrie bei der späteren Interpretation der Ergebnisse hilfreich. Im nächsten Schritt gilt es, die

Zusammenbauoperationen zwischen den einzelnen Bauteilen sowie Bauteilen und Produktionsanlagen zu definieren. Dies erfolgt nach Vorgabe der Fügefolge (siehe 2 in Abbildung 4.16). Funktionale Flächen an Bauteilen, die nicht zur Definition eines Bezugssystems herangezogen wurden, jedoch Bestandteil der Toleranzkette sind, erhalten im Lauf des Produktentwicklungsprozesses eine entsprechende Toleranz. Nutzt man im Simulationsmodell nun Punkte, welche auf diesen Flächen liegen, ist es erforderlich, diesen Punkten die hinterlegte Toleranzinformation der Fläche mitzugeben (3 in Abbildung 4.16). Im nächsten Schritt müssen Messungen auf der Basis der in Kapitel 4.1.3 dargelegten Qualitätsmerkmale erfolgen. Auch hier ist die Berücksichtigung etwaiger Toleranzen der messpunkttragenden Geometrie notwendig (4 in Abbildung 4.16). Bei der Simulation ist es notwendig, relevante Parameter (Anzahl der Durchläufe, GD&T Standard etc.) zu setzen. Basierend auf diesen Informationen kann das Simulationsmodell dann berechnet werden.

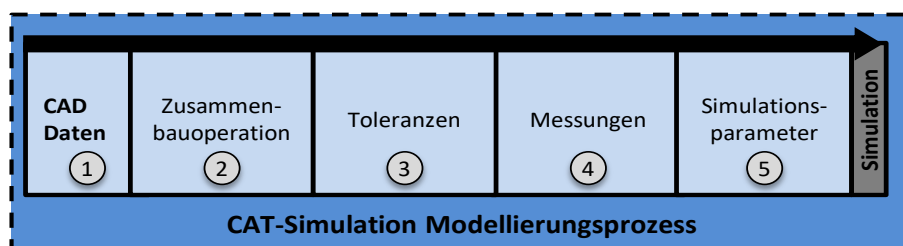


Abbildung 4.16 CAT-Simulation Modellierungsprozess

#### 4.2.1.5 Abgeleitete Anforderungen an das neutrale Austauschformat (aus CAT-Software Sicht)

Punktbasierte Toleranzsimulationsmodelle, wie sie im automobilen Rohbau Anwendung finden, stellen an ein neutrales Austauschformat spezifische Strukturierungsvorgaben (siehe Abbildung 4.17).

Der oberste Knoten wird durch die Simulationsklasse gebildet. Darin sind Attribute, wie der Name der Simulation, die Parameter zur Durchführung der Simulation (Anzahl an Simulationsdurchläufen, GD&T etc.) sowie die Baugruppen, die Bestandteil der Simulation sind, enthalten. Die Baugruppen-Klasse besteht wiederum aus Attributen, wie dem Namen, dem Pfad (verweist auf die eigentliche CAD-Geometrie), der Elternbeziehung, der Kindbeziehung sowie den Zusammenbauoperationen und Messungen. Auch hier ist das Instanzieren mehrere Objekte an Baugruppen möglich, wodurch das Abbilden der Fügefolge möglich wird. Die Klasse Toleranzen ist eine abstrakte Klasse, die Attribute wie Upper

Specification Limit (USL) oder Lower Specification Limit (LSL) trägt. Diese Standardattribute liegen in jeder daraus abgeleiteten Toleranzklasse vor und können zudem noch durch Attribute wie Name oder referenziertes Bezugssystem etc. ergänzt werden.

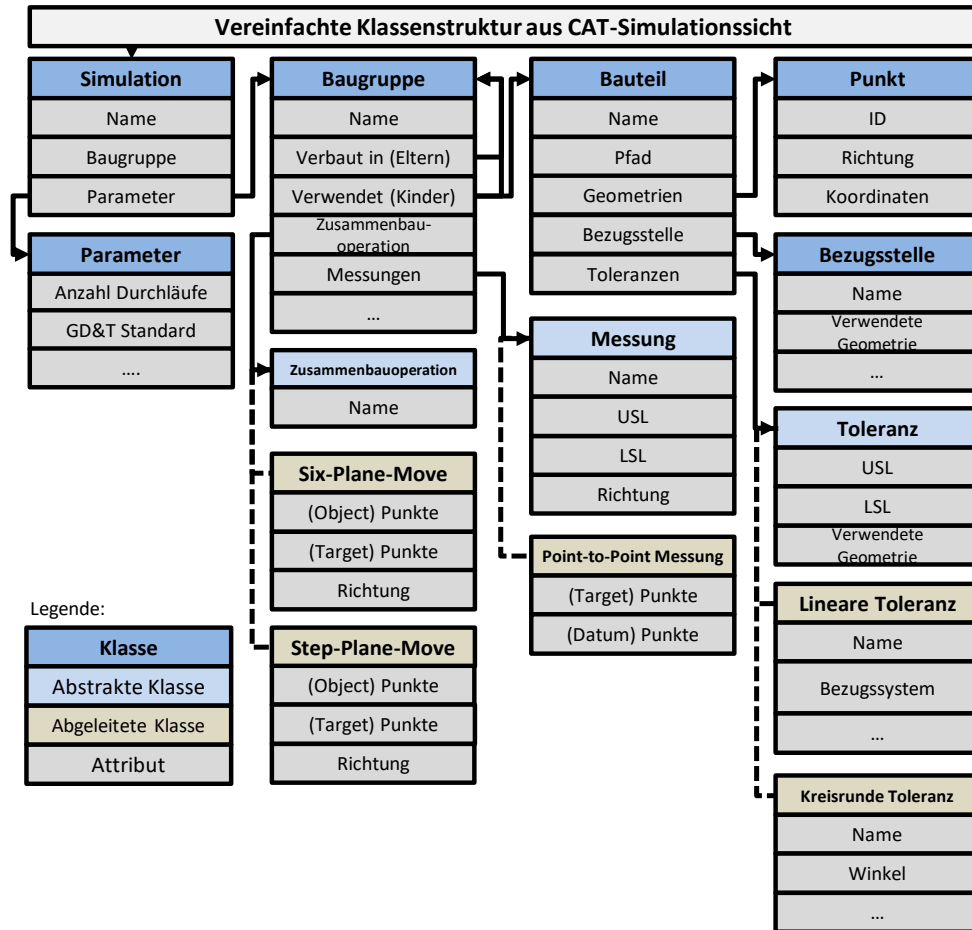


Abbildung 4.17 Klassengerüst aus CAT-Softwaresicht zum Informationsaustausch mit dem PDM-, CAD-System

#### 4.2.2 Methode zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen

Im nachfolgenden Kapitel erfolgt die Beantwortung der Forschungsfrage **Methode 2** (M2 in Abbildung 4.1). Dabei wird zunächst der grundlegende Algorithmus zum Übertragen der Informationen aus dem PDM- bzw. CAD-System zur Toleranzsimulationssoftware vorgestellt. Anschließend folgt eine detailliertere Darstellung des Algorithmus, der bei der Auswahl geeigneter Montagepunkte zum Aufbau statisch bestimmter punktbasierter Toleranzsimulationsmodelle verwendet wird. Die Umsetzung der erarbeiteten Methoden im praktischen Kontext des Karosserierohbaus findet sich in Kapitel 6.6.

#### 4.2.2.1 Grundlegender Algorithmus zum Übertragen der Informationen aus dem PDM-, CAD-System zur Toleranzsimulationssoftware

Wie im vorangegangenen Kapitel erwähnt, kann der Informationsaustausch durch eine Schnittstelle nur erfolgen, wenn die Klassengerüste der beiden Schnittstellenpartner architektonische Gemeinsamkeiten aufweisen. Daneben sind übergreifend funktionale Gemeinsamkeiten der Informationen nötig. Beim Vergleich von Abbildung 4.15 und 4.17 fällt auf, dass in beiden Systemen die Fügefolge mithilfe einer gewurzelten Baumstruktur dargestellt wird. Weiterhin werden in beiden Systemen die Produkt- und Produktionsentwicklungsinformationen in Bauteilen und Baugruppen abgelegt. Die Zuordnung dieser Informationen in die Vorgaben der Toleranzsimulationssoftware ist damit möglich. Einzig das Abbilden von Montageoperationen sowie das Abbilden von Messungen sind nicht möglich. Basierend auf den funktionalen und prozessualen Abhängigkeiten ist es jedoch möglich, eine korrekte Zuordnung der Informationen zu erreichen. Ein entsprechender Algorithmus, der in seinen Grundzügen im nachfolgenden Kapitel erläutert wird, stellt diese Zuordnung sicher. Generell erfolgt die Datenzuordnung wie in Abbildung 4.18 dargestellt.

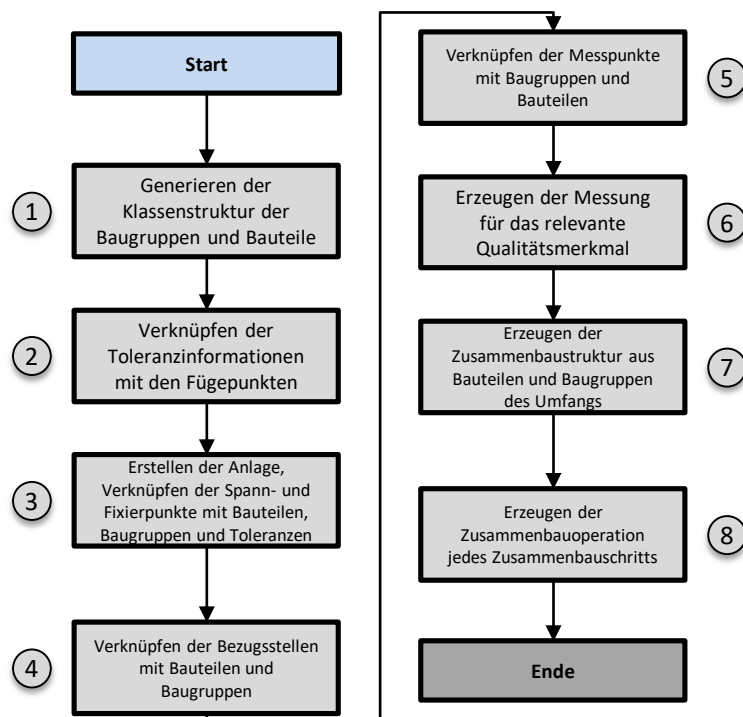


Abbildung 4.18 Algorithmus zur Zuordnung der Informationen aus Produkt- Produktionsentwicklungsprozess in die Vorgaben aus Sicht der Toleranzsimulationssoftware

Zunächst wird die notwendige Klassenstruktur für sämtliche Baugruppen und Bauteile generiert. Anschließend müssen den Fügestellen die gefügten Bauteile zugeordnet sowie die

auf den Bauteilen wirkenden Toleranzen zugewiesen werden. Im nächsten Schritt erfolgt das Erstellen der Geostation aus den Aufnahmepunkten des Spann- und Fixierkonzeptes. Die Klassenstruktur der Geostation entspricht dabei der eines Bauteiles. Durch diese Geostation kann sichergestellt werden, dass auch prozessbedingte Toleranzen wie Positionierungsungenauigkeiten durch den Verbau Berücksichtigung im Simulationsmodell finden. Durch die (prozessbezogene) digitale Fügefolge ist es zudem möglich, den einzelnen Bauteilen und Baugruppen die richtigen Spannstellen der einzelnen Aufbaustufen zuzuordnen. Erfolgt das Spannen auf einer tolerierten Bauteilgeometrie kann zudem die wirkende Toleranz verknüpft werden. Auch Bezugsstellen sowie Messpunkte lassen sich in den darauffolgenden Schritten den Bauteilen und Baugruppen zuordnen. Basierend auf dem digitalen Funktionsmaßkatalog sowie den Messpunkten aus dem Fugen- und Radienplan kann durch den Anwender die Selektion eines Qualitätsmerkmals erfolgen. Nachdem die Zuordnung der simulationsrelevanten Daten erfolgt ist, kann basierend auf der digitalen Fügefolge die finale Struktur des Simulationsmodells festgelegt werden. Dafür ist es notwendig, für jede Fügestation eine entsprechende Montageoperation anzulegen und entsprechende Montagepunkte zu definieren (siehe nachfolgendes Kapitel).

#### **4.2.2.2 Algorithmus zur Auswahl geeigneter Montagepunkte für statisch bestimmte punktbasierte Toleranzsimulationsmodelle**

Aus der Produkt- und Prozessentwicklung ergeben sich viele mögliche Montagepunkte:

- Bezugspunkte
- Spann- und Fixierpunkte
- Verbindungspunkte

Bei der Erstellung von statisch bestimmten Montageoperationen muss die Vielzahl der prinzipiell möglichen Punkte auf die entscheidenden Montagepunkte reduziert werden. Dabei muss aber sichergestellt sein, dass das spätere Simulationsmodell den realen Verbauprozess so gut wie möglich abbildet.

Der dazu entwickelte Algorithmus wird im Folgenden in seinem Grundprinzip erläutert. Eine detaillierte praxisnahe Ausführung des Algorithmus in Bezug auf Karosserierohbausimulationen findet sich in Kapitel 6.6.4.

Zu Beginn erfolgt für die zu berechnende Montageoperation eine Fallunterscheidung zur Bestimmung des relevanten Verbaufalls. Hierbei können die folgenden Verbaufälle auftreten:

- Fall 1: Einlegen eines Bauteiles in die Produktionsanlage
- Fall 2: Montage des Bauteiles auf ein weiteres Bauteil
  - Fall 2.1: Teilweises Einspannen der Bauteile in der Produktionsanlage und auf andere Bauteile / Baugruppen
  - Fall 2.2: Reines Spannen der Bauteile auf andere Bauteile / Baugruppen
- Fall 3: Montage des Bauteiles auf mehrere weitere Bauteile
  - Fall 3.1: Teilweises Einspannen der Bauteile in der Produktionsanlage und auf andere Bauteile / Baugruppen
  - Fall 3.2: Reines Spannen der Bauteile auf andere Bauteile / Baugruppen

Bei der Zuordnung des Verbaufalls werden Informationen aus dem Spann- und Fixierkonzept sowie der digitalen Fügefolge benötigt. Durch die geometrische Lage der Spannstellen in Verbindung mit der / den Bauteilgeometrie/n einer Verbaustation ist es möglich, eine eindeutig Zuordnung möglich. Es kann klar festgestellt werden, ob es sich um einen Spannungspunkt des Bauteiles in der Anlage handelt oder ob ein Abspannen zwischen zwei oder mehreren Bauteilen erfolgt.

Nach Zuordnung des Verbaufalls kann aus den möglichen Verbaupunkten eine Auswahl für die primäre, sekundäre sowie tertiäre Ausrichtung erfolgen. Die Art des Verbaufalls beeinflusst dabei die Anzahl der möglichen Verbaupunkte. So kann beispielweise im Gegensatz zu den Fällen 2.2 und 3.2 im Verbaufall 1 keine Verbindungstechnik genutzt werden.

Bei der Bestimmung der primären Ausrichtung des Bauteiles in der Anlage oder der Bauteile zueinander werden die folgenden Faktoren in die Montagepunktauswahl berücksichtigt:

- Größe des aufgespannten Dreiecks
- Ausrichtung des Dreiecks in Bezug auf die Wirkrichtung der primären Ausrichtung
- Ausrichtung des Dreiecks in Bezug auf das zu simulierende Qualitätsmerkmal
- Ausrichtung jedes einzelnen Montagepunktes in Bezug auf das zu simulierende Qualitätsmerkmal
- Abstand des Dreiecksschwerpunkts vom zu simulierenden Qualitätsmerkmal

Bei der Berechnung der sekundäre Ausrichtung der Montageoperation werden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Länge der aufgespannten Strecke
- Orthogonalität des Streckenvektors in Bezug auf die Normale des Dreiecks der primären Ausrichtung
- Ausrichtung der Strecke in Bezug auf die Wirkrichtung der sekundären Ausrichtung
- Ausrichtung der Strecke in Bezug auf die Wirkrichtung des zu simulierenden Qualitätsmerkmals

Die Bestimmung der tertiären Ausrichtung des Bauteils in der Anlage oder der Bauteile zueinander erfolgt durch die folgenden Parameter:

- Orthogonalität des Ausrichtpunkts in Bezug auf die Normale des Dreiecks der primären Ausrichtung sowie zum Streckenvektor der sekundären Ausrichtung
- Abstand der möglichen Montagepunkte in Bezug auf das zu simulierende Qualitätsmerkmal

Damit lassen sich die erforderlichen Punkte zur Definition der Montageoperation für statisch bestimmte Toleranzsimulationsmodelle berechnen. Der Aufbau des Toleranzsimulationsmodelles ist somit automatisiert durchführbar. Lediglich der Umfang des Modelles sowie das zu bewertende Qualitätsmerkmal werden vom Anwender manuell vorgegeben.

#### **4.2.3 Methode zur Kopplung von PDM- / CAD-System sowie CAT-Toleranzanalysetool an einen Optimierer nach [Litw5, Litw6, Litw7]**

Im folgenden Kapitel erfolgt die strukturierte Beantwortung der Forschungsfrage **Methode 3** (M3 in Abbildung 4.1). Zunächst erfolgt die Ausarbeitung eines Schnittstellenkonzepts der beteiligten Softwarepartner. Anschließend werden Zusammenhänge und Abhängigkeiten der zu optimierenden Eingangsdaten im Kontext des Produktentwicklungsprozesses aufgezeigt. Daraus werden Vorgaben an ein neutrales Austauschformat aus Produktentwicklungssicht abgeleitet. Dabei gilt es, Abhängigkeiten innerhalb eines Optimierungsprogrammsystems darzustellen, um daraus entsprechende Vorgaben an ein neutrales Austauschformat zu generieren. Abschließend kann ein grundlegender Algorithmus zum Übertrag der

Informationen aus PDM-, CAD-System sowie Toleranzsimulationssoftware zum Optimierungsprogrammssystem definiert werden.

#### 4.2.3.1 Schnittstellenkonzept des Optimierungsprogrammsystems mit dem PDM/CAD-System sowie der Toleranzsimulationssoftware

Die gängigen Optimierungstools bieten mehr oder weniger stark ausgeprägte Schnittstellen in Bezug auf kundeneigene Integrationsvorhaben an. So erlaubt die Software LS-OPT beispielsweise die Implementierung von LS-DYNA Projekten und einfachen ASCII Dateien. ModeFrontier und optiSLang dagegen erlauben die Erzeugung eigener Knoten, die auf einer objektorientierten Programmierung basieren. Weiterhin bieten sie eine entsprechende Typenbibliothek (API), mit deren Hilfe sich diese Knoten kundenspezifisch gestalten lassen. Diese Offenheit der Programme ist erforderlich, um das nachfolgende Konzept umsetzen zu können. Im nächsten Schritt sollen die Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Informationen in Bezug auf ein Optimierungsvorhaben erläutert werden.

#### 4.2.3.2 Interdependenzen der Informationen im Produkt- und Produktionsentwicklungsprozess in Bezug auf die Optimierung dieser Daten

Aus Produkt- und Produktionsentwicklungssicht bestehen bezüglich der Optimierung Abhängigkeiten und Zusammenhänge der Informationen. Diese werden nachfolgend aufgezeigt. Zudem ist Abbildung 4.19 um die Optimierung erweitert.

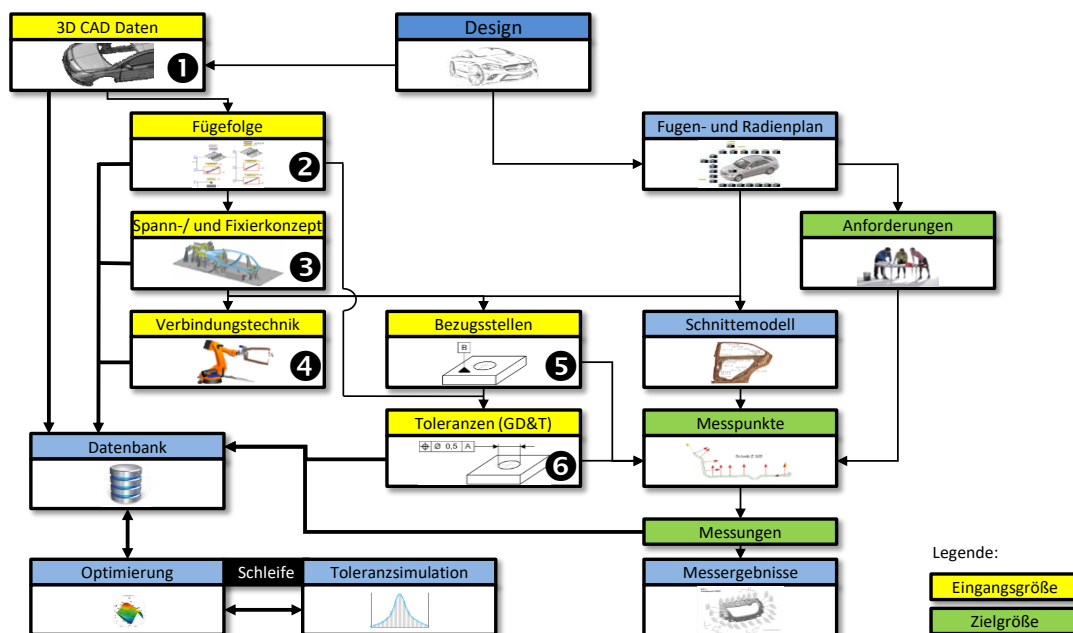


Abbildung 4.19 Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Informationen aus PDM- /CAD-System in Bezug auf die Optimierung



Eingangsgrößen für den Optimierer sind sämtliche Größen, die zum Aufbau eines Toleranzsimulationsmodelles benötigt werden. Diese wurden bereits in Kapitel 4.2.1.1 identifiziert (CAD-Daten, Fügefolge, Spann- und Fixierkonzept, Verbindungstechnik, Bezugsstellen, Toleranzen). Die Variation der CAD-Geometrie durch den Optimierer kann durch die Übergabe von kontinuierlichen Parametern wie Flanschgröße oder Flanschwinkel erfolgen. Die Fügefolge dagegen ist eine diskrete Variable mit einer finiten Anzahl an Varianten, die an das Optimierungsprogrammsystem übergeben werden. Sämtliche Punkte, die beim Erstellen der Simulationsmodelle zur Definition von Kontaktbedingungen herangezogen werden (Spann- und Fixierkonzept, Verbindungstechnik, Bezugsstellen), stellen wiederum kontinuierliche Parameter im Hinblick auf eine Optimierung dar.

Auch Ungenauigkeiten des Fertigungsprozesses lassen sich, beispielsweise mithilfe stochastischer Variablen, an das Optimierungstool übergeben. Auch die Toleranzen an sich stellen einen kontinuierlichen Parameter dar. Als Zielgrößen stehen sämtliche Informationen aus dem Fugen- und Radienplan sowie dem Funktionsmaßkatalog zur Verfügung. Die dort spezifizierten Messungen weisen die zu erreichenden Zielmerkmale auf (z. B. durch Vorgaben aus dem Management). Diese Zielgrößen stellen wiederum kontinuierliche Größen mit bekannter Spannweite im Hinblick auf die Optimierung dar.

Bei Durchführung einer Optimierung sind die Abhängigkeiten der Eingangsdaten untereinander zu beachten. Das hat zur Folge, dass das Ausmaß der Variation der Eingangsdaten berücksichtigt werden muss. Möglicherweise erfordert das Optimieren einer Eingangsgröße Änderungen vieler weiterer am Simulationsmodell beteiligter Größen. Eine Gewichtung der Eingangsgrößen zueinander ermöglicht es dem Optimierer, eine kritische Anpassung der Eingangsgrößen zu vermeiden. Zur Übergabe all dieser Parameter kann beispielsweise eine Datenbank analog Abbildung 4.19 verwendet werden. Die Kommunikation mittels standardisiertem Austauschformat (z. B. XML) erleichtert die Datenübergabe an das Optimierungsprogrammsystem. Die Anforderungen an ein solches Format werden nachfolgend erläutert.

#### **4.2.3.3 Abgeleitete Vorgaben an ein neutrales Austauschformat**

Die Strukturierung der Datenbank erfordert zunächst eine ausführliche Analyse des Klassengerüsts (siehe auch Abbildung 4.20).

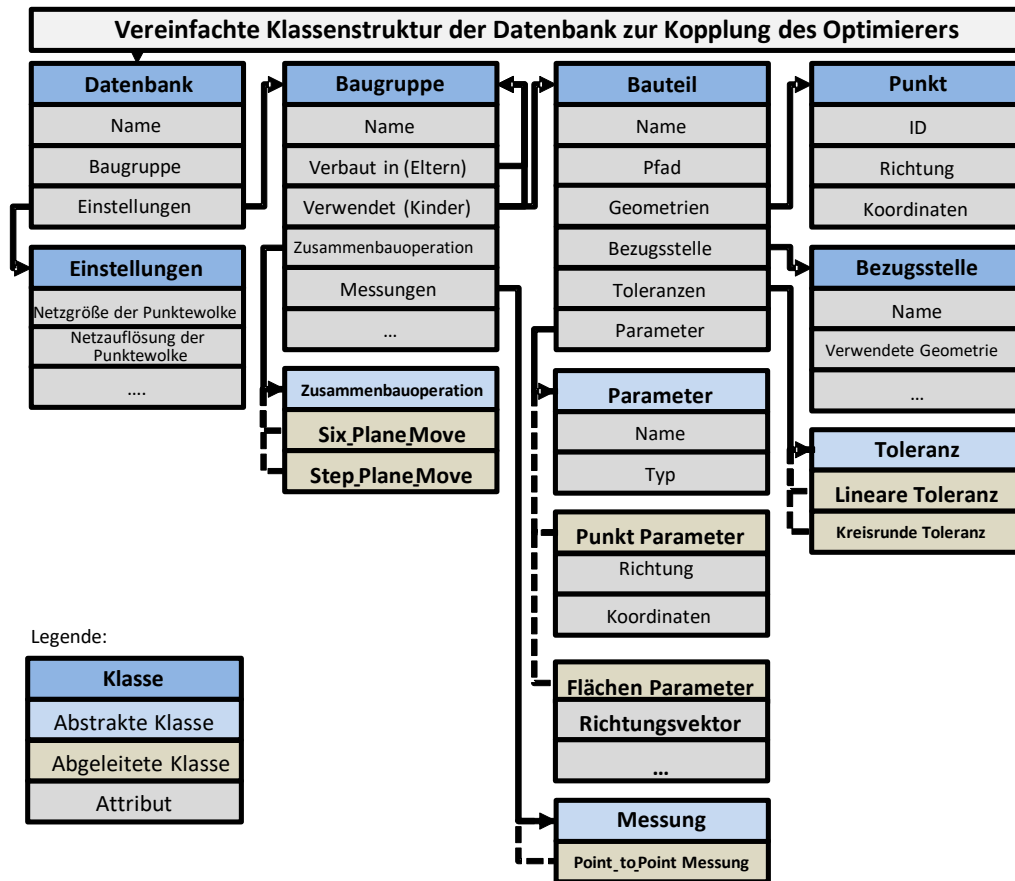


Abbildung 4.20 Klassengerüst der Datenbank zur Anbindung eines Optimierers an PDM-, CAD-System und CAT-Software

Analog zum Informationsaustausch zwischen PDM-, CAD-System mit der Toleranzsimulationssoftware soll auch hier die Strukturierung der Informationen in Baugruppen und Bauteilen geschehen. Aus diesem Grund erfolgt das Abbilden des zu optimierenden Umfangs in der Klasse Baugruppe, die wiederum die Attribute analog der Darstellung in Abbildung 4.15 besitzt. Die Klasse Bauteil wird ebenso spezifiziert wie in Abbildung 4.15. Einzig das Attribut Parameter, das selbst wiederum mehrere Instanzen der Objekte Parameter erzeugen kann, unterscheidet das Klassengerüst hier. Die Klasse Parameter dagegen stellt eine abstrakte Klasse dar, die Attribute wie Name oder Typ beinhaltet. Die daraus abgeleiteten Klassen können dann um die jeweiligen Attribute wie Koordinaten, Richtungsvektor oder Variante erweitert werden. Eine zusätzliche Klasse bildet die angestrebte Variationsanalyse (Sensitivitätsanalyse und Optimierung). Diese beinhaltet Attribute wie Einstellungen für die Sensitivitätsanalyse oder Einstellungen für die Optimierung. Mithilfe dieses Gerüsts ist es möglich, die Datenbank zur Anbindung an das Optimierungsprogramm aufzubauen. Ein ausführliches Beispiel zu dieser Datenbank findet sich in Kapitel 6.5.

#### 4.2.3.4 Abhängigkeiten der Informationen im Optimierungsprogrammssystem

Auch das Optimierungsprogrammssystem berücksichtigt Abhängigkeiten und Zusammenhänge zwischen Informationen, um aus den Eingangsdaten sowie Zielgrößen eine Optimierung zu generieren. Diese sind in Abbildung 4.21 dargestellt.

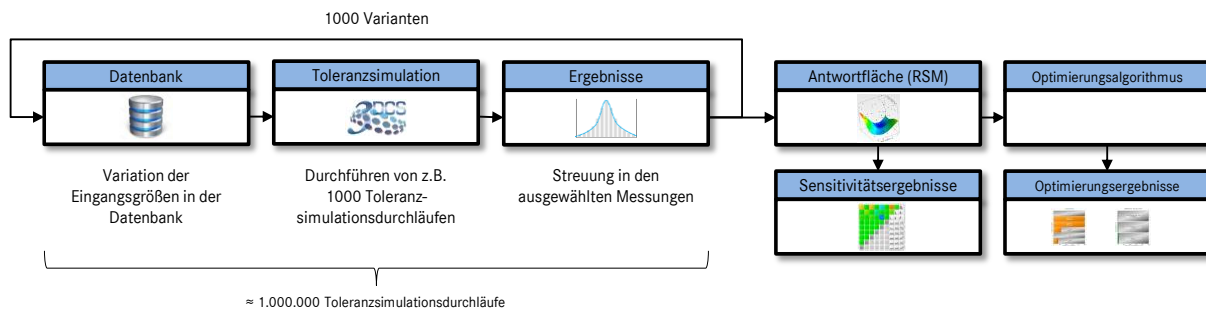


Abbildung 4.21 Abhängigkeiten der Informationen im Optimierungsprogrammssystem

Zunächst müssen dem Optimierungsprogrammssystem Eingangsgrößen zur Verfügung gestellt werden, anhand derer eine Sensitivitätsanalyse sowie eine Optimierung durchgeführt werden. Außerdem müssen dem System Zielgrößen vorgegeben werden, die sich möglicherweise in Abhängigkeit einer oder mehrerer Eingangsgrößen verändern. Zudem muss eine Beziehung zwischen den Eingangsgrößen sowie den Zielgrößen hergestellt werden. Dies kann durch mathematische Funktionen erfolgen oder durch die Kopplung eines Simulationsmodules. Im dargestellten Beispiel wird mithilfe der Toleranzsimulation die Verteilung des Qualitätsmerkmals ermittelt. Der Aufbau der zahlreichen Simulationsmodelle erfolgt dabei mithilfe des in Kapitel 6.6.4 dargestellten Algorithmus. Um die Sensitivitäten der einzelnen Eingangsparameter berechnen zu können, ist es nötig, diesen eine Variation in ihrer Ausprägung zu erlauben. Auch das muss in der Datenbank der Eingangsgrößen vermerkt sein. Anschließend kann eine Abtastmethode des Versuchsraumes (Designraum) festgelegt werden. Dabei ist grundsätzlich zwischen deterministischen und stochastischen Verfahren zu unterscheiden. Eine ausführliche Beschreibung sowie eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile dieser Verfahren finden sich in Kapitel 2.4.1. Nachdem die zu lösenden Stichproben des Versuchsraumes festgelegt sind, können diese Stützstellen zur Berechnung einer den gesamten Versuchsraum abdeckenden Antwortfläche genutzt werden. Die Berechnungsverfahren zum Erzeugen dieser Antwortflächen finden sich ebenfalls in Kapitel 2.4.1. Mithilfe dieser Antwortfläche lässt sich eine Aussage über die Sensitivitäten jedes einzelnen Parameters in Bezug auf das / die Qualitätsmerkmal(e) treffen. Basierend auf der Antwortfläche kann abschließend das globale Minimum der mehrdimensionalen Funktion

mithilfe verschiedener Optimierungsalgorithmen bestimmt werden. Die Parameterkombination des so gefundenen Optimums stellt das bestmögliche Design dar.

#### 4.2.3.5 Abgeleitete Vorgaben an ein neutrales Austauschformat

Aus den oben genannten Abhängigkeiten ergibt sich das in Abbildung 4.22 dargestellte Klassengerüst eines Optimierungsprogrammsystems. Nachfolgend nur die wichtigsten Klassen und Attribute näher erläutert. Die obersten Klassen bilden die Sensitivitätsanalyse und die Optimierung. Innerhalb der Klasse Sensitivitätsanalyse findet sich unter anderem das Objektattribut Parametrisches System. Dieses verweist auf die Klasse Parametrisches System, welche die Objektattribute Input, Solver sowie Output besitzt. Instanzen dieser Objekte beinhalten später die Eingangsparameter der Optimierung des Toleranzsimulationsmoduls als Solver sowie die Qualitätsmerkmale als Zielgrößen. Wiederverwendung findet das Parametrische System in der Optimierung. Die abstrakte Klasse wird hier durch ein Attribut erweitert. Mithilfe des Metamodells sind so Optimierungen auf der Antwortfläche des Systems möglich.

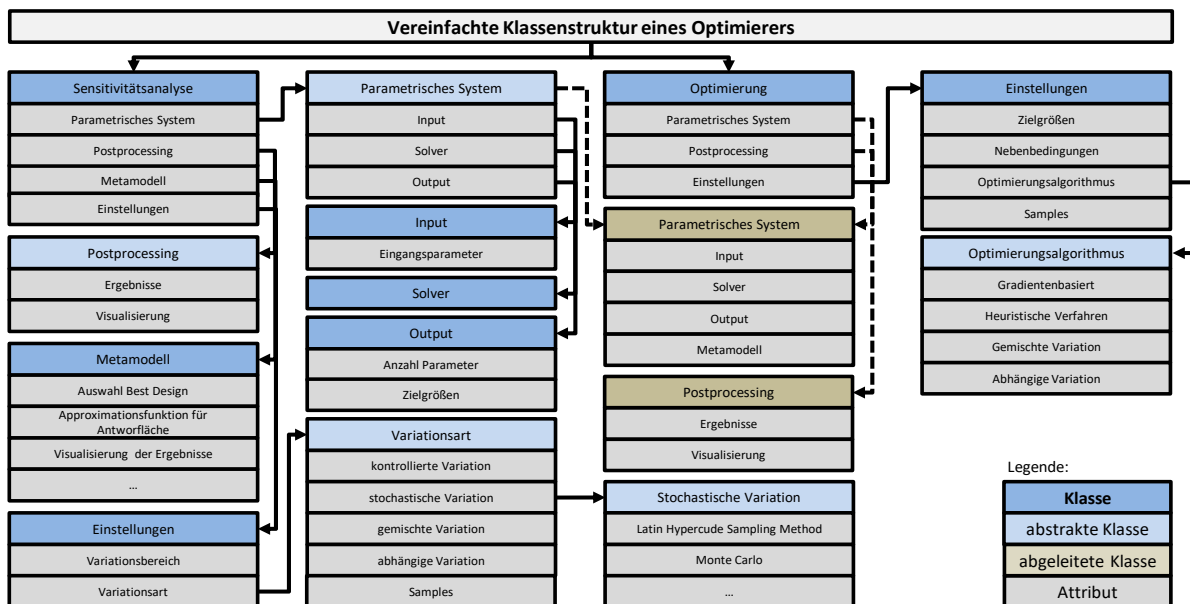


Abbildung 4.22 Vereinfachte Klassenbibliothek eines Optimierers

#### 4.2.3.6 Grundlegender Algorithmus zum Übertrag der Informationen aus dem PDM-, CAD-System und der Toleranzsimulationssoftware zum Optimierungsprogrammsystem

Um ein Toleranzsimulationsmodell aufzubauen, sind zahlreiche Informationen aus dem Produkt- und Produktionsentwicklungsprozess nötig (siehe ① in Abbildung 4.23). Zur Kopplung eines Optimierers an die Informationen sind diese aus ihrer systemspezifischen

Umgebung auszulesen (z. B. PDM oder CAD). Dazu stellen moderne CAD-Systeme entsprechende Schnittstellen bereit. Anschließend können diese Informationen strukturiert in einer Datenbank abgespeichert werden (② in Abbildung 4.23). Die Klassenstruktur der Datenbank findet sich in Abbildung 4.22. Als Datenbankformat eignet sich beispielsweise XML. Sobald die Datenbank vollständig mit den erforderlichen Informationen bestückt ist, kann die Registrierung der zu optimierenden Parameter erfolgen. Im vorliegenden Beispiel wird davon ausgegangen, dass die Parameter Verbindungstechnik, Spann- und Fixierkonzept, Bezugsstellen, Toleranzausprägung etc. als Eingabe zur Auswahl der Parameter nötig ist. Nach der Auswahl geeigneter Parameter erfolgt der erste Aufruf des Tools zum Aufbau von CAT-Simulationen. Dabei werden die initialen Parameterwerte an das Tool übergeben und daraus ein Toleranzsimulationsmodell abgeleitet (Start-Design). Nachdem dieses berechnet worden ist, kann der Nutzer die zu optimierenden Qualitätsmerkmale wählen. Soll die spätere Optimierung auf Basis eines Antwortflächenmodells erfolgen, so ist die Berechnung dieser Fläche nötig. Dazu sind zahlreiche Toleranzsimulation durchzuführen, um eine entsprechend hohe Anzahl an Stützstellen für die Fläche zu generieren. Für jeden Simulationsdurchlauf (Design of Experiments) erfolgt dabei eine Änderung der Eingangsparameterwerte innerhalb des zuvor definierten Bereichs (Range). Aufgrund der Änderung der Eingangsparameter muss für jedes zu simulierende Szenario (Design) der automatisierte Aufbau des Toleranzsimulationsmodells erfolgen (④ in Abbildung 4.23). Notwendig ist dies, da möglicherweise geeignetere Punkte zum Erstellen von Zusammenbauoperationen vorliegen können (vgl. Kapitel 0). Die Lösungen der berechneten Toleranzsimulationsmodelle (vgl. ⑤ in Abbildung 4.23) müssen dann dem Optimierungstool zurückgemeldet werden. Basierend auf diesen Ergebnissen kann somit die Berechnung einer globalen Sensitivitätsmatrix erfolgen und das Antwortflächenmodell entstehen (③ in Abbildung 4.23). Auf diesem Antwortflächenmodell erfolgt dann die Suche nach dem globalen Optimum.

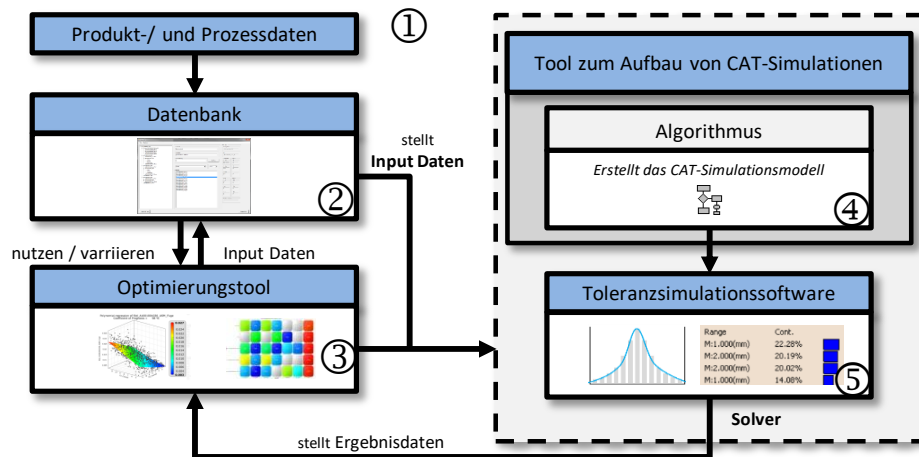


Abbildung 4.23 Grundlegender Algorithmus zum Übertrag der Informationen aus dem PDM-, CAD- System und der Toleranzsimulationssoftware zum Optimierungstool

### 4.3 Veränderte Organisationsform sowie Prozessentwicklung als Grundlage eines effizienten Toleranzmanagements

Im folgenden Kapitel erfolgt die Beantwortung der Forschungsfragen **Prozess 1 – Prozess 4** (P1-P4 in Abbildung 4.1). Dabei wird zunächst eine Organisationsform aufgezeigt, in deren Kontext die informationstechnischen sowie methodischen Ansätze der vorangegangenen Kapitel einfach umsetzbar sind. Auch gilt es den Toleranzmanagementprozess aus Kapitel 2.3.3 nochmals zu untersuchen, damit kritische Pfade im Entwicklungsprozess vermieden werden können. Daneben erfolgt die weitere Optimierung der Prozesse, welche sowohl innerhalb des Toleranzmanagements als auch in anderen Gewerken den Informationsfluss ermöglichen.

#### 4.3.1 Organisationsform für effizientes Toleranzmanagement

Generell gibt es zwei Arten der Ablauforganisation im Produktentwicklungsprozess: die produktbezogene und funktionale (siehe Kapitel 2.2.3). Im Hinblick auf das Toleranzmanagement führt eine produktbezogene Organisation, d.h. die Verankerung des Toleranzmanagements im jeweiligen Fahrzeugprojekt, zu bestmöglichen Lösungen [VDA4]. Dabei ergeben sich innerhalb des Projekts eng abgestimmte, fahrzeugspezifisch ideale Konzepte. Zudem bietet diese Struktur den Vorteil eines stärkeren „Zusammengehörigkeits- und Erfolgsgefühls“ der Mitarbeiter bei der Fertigung des jeweiligen Produkts [Ehre, Meer].

Vor dem Hintergrund einer weltweiten Produktion mehrerer Baureihenprojekte in möglichst einheitlichen Produktionsanlagen können bei Anwendung der produktbezogenen

Ablauforganisation allerdings sehr schnell Komplikationen auftreten. Idealerweise sollten hier baureihenübergreifende Standards greifen, sodass möglichst einheitliche Produktionsprozesse realisiert werden können. So ist es beispielsweise sinnvoll, die Ausrichtung verschiedener Bauteile zueinander konzeptgleich durchzuführen, um gleiche Produktionshardware nutzen zu können. Eine funktionale Organisation erleichtert das Schaffen von produktübergreifenden Standards führt allerdings zu einer geringer ausgeprägten Identifizierung der Mitarbeiter mit dem jeweiligen Produkt.

Deshalb stellt für das Toleranzmanagement die sogenannte Matrix-Organisation als Mischform die ideale Lösung dar. Bezüglich des Toleranzmanagements im Karosserierohbau erfolgt so zum Beispiel eine projektbezogene Zergliederung in die einzelnen Aufbaustufen eines Rohbaus (Vorbau, Hauptboden, Heckwagen, Seitenwände, Dach, Klappen, Anbauteile). Weiterhin gibt es innerhalb des Projekts eine klare Zuweisung der Verantwortung. Ein Mitarbeiter ist also verantwortlich für je ein Arbeitsergebnis: Ausrichtkonzepte, Montage- und Anbauteile sowie Funktionsmaßkatalog und Fugen- und Radienplan. Um übergreifende einheitliche Standards für die verschiedenen Fahrzeugarchitekturen zu schaffen, ist die zusätzlich projektübergreifende Bereitstellung eines verantwortlichen Toleranzplanungsingenieur für je eines der oben genannten Bereiche notwendig. Dadurch wird zudem ein baureihenübergreifender Standard der Informationsbereitstellung gewährleistet. Innerhalb der einzelnen Fahrzeugarchitekturen ist durchaus eine noch feinere Zergliederung denkbar (über Fahrzeugbereiche, die eine konzeptgleiche Konstruktion aufweisen), um der steigenden Anzahl an Derivaten gerecht werden zu können. Dadurch lassen sich mit gleichbleibender Toleranzplanungsingenieurskapazität bis zu einem gewissen Grad die immer weiter steigenden Derivatanzahlen abdecken sowie die erarbeiteten Methoden aus den vorangegangenen Kapiteln umsetzen. Abbildung 4.24 verdeutlicht die ideale Organisationsform für effizientes Toleranzmanagement.

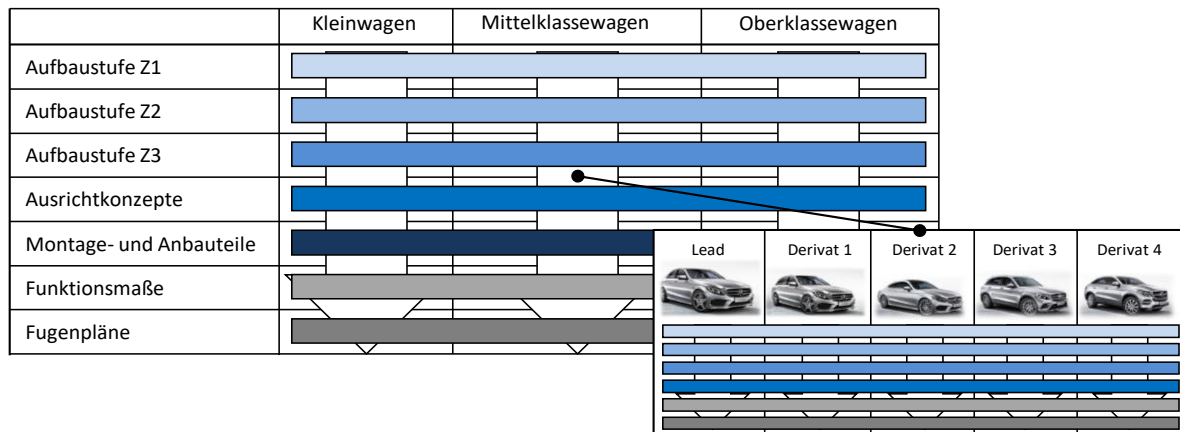


Abbildung 4.24 Matrix Organisationsform für Toleranzmanagement innerhalb des Karosserierohbaus

### 4.3.2 Prozessentwicklung zur Reduzierung kritischer Pfade im Bereich Toleranzmanagement

Neben der rein organisatorischen Umsetzung des Toleranzmanagements im Unternehmen ist auch die Art der Ausführung ein bedeutender Faktor. Bei genauerer Betrachtung des Entwicklungsprozesses in Bezug auf das Toleranzmanagement ergeben sich einige Verbesserungspotenziale, um effizienteres Toleranzmanagement zu realisieren. Generell lassen sich hier die zwei Arten des Toleranzmanagements unterscheiden: Präventives Toleranzmanagement sowie reaktives Toleranzmanagement. Je nach Ausprägung innerhalb des Unternehmens ergeben sich daher zu den entsprechenden Datenfreigaben unterschiedliche vorgelagerte Meilensteine.

Im Hinblick auf die Freigabe des ersten konsistenten Datenstandes, auf dessen Basis Anfrageunterlagen der Produktionsanlage erstellt werden, besteht Handlungsbedarf. Aufgrund immer weiterer Verkürzungen der Produktentwicklungszeiten erfolgt die Erstellung der ersten Anfrageunterlagen auf Basis von nicht final eingefrorenen Daten wie der Ausrichtung, der Fügefolge oder der Bezugsstellen. Die finale Freigabe dieser Daten erfolgt erst mit dem Durchschreiten des entsprechenden Quality Gates (z. B. QG-F). Beispielsweise führt das erhöhte Änderungsaufkommen kurz vor der Freigabe zu massiven Inkonsistenzen in den Daten im Hinblick auf das Toleranzmanagement. Anpassungen von Bezugssystemen, Ausrichtkonzepten bis hin zu Änderungen der Fügefolge bis kurz vor Datenfreigabe sind v. a. gegen Ende der Vorentwicklungsphase (vgl. Kapitel 2.3.4) gängig. Das führt zu einem Verlust an Reifegrad beim Durchschreiten von QG-F. Gerade beim Ausleben von präventivem Toleranzmanagement besteht daher gerade an dieser Stelle dringender Handlungsbedarf.



Präventives Toleranzmanagement bietet die Vorteile, durch Mitsprache in sehr frühen Fahrzeugphasen neue Konzepte zur Ausrichtung und Montage von Bauteilen zu schaffen oder frühzeitig Einfluss auf die Fügefolge zu nehmen. So lässt sich ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess über die verschiedenen Produkte des Unternehmens realisieren (Prävention). Neukonzepte bergen jedoch auch Risiken, die sich womöglich erst im Anlauf des Produktes bemerkbar machen. Durch Digitales Mockup lässt sich dieses Risiko bereits in sehr frühen Entwicklungsphasen minimieren. Dazu notwendig ist jedoch ein konsistenter Datenstand der beteiligten Gewerke Konstruktion, Produktionsplanung sowie Toleranzmanagement. Der Produktentstehungsprozess sieht eine solche zusätzliche Datenbereitstellung (Meilenstein) kurz vor der finalen Datenfreigabe bisher nicht vor.

Der gängige Entwicklungsprozess entspricht bisher eher dem Vorgehen eines reaktiven Toleranzmanagements (nachgelagerte Iterationen). Dabei erfolgt initial die Übernahme der Ausrichtkonzepte von Vorgängerbaureihen bzw. der Lead-Baureihe. Zum Quality Gate F erfolgt dann die Bereitstellung dieses Vorgängerkonzeptes im Datensatz. Eine Optimierung des Konzeptes kann damit erst beim Durchschreiten des nachfolgenden Quality Gates (QG-G) erfolgen und entsprechend bereitgestellt werden. Zusätzliche Meilensteine sind damit nicht erforderlich.

Bei der Durchführung von präventivem Toleranzmanagement hingegen erfordert die komplexe Produktstruktur im Rohbau einen zusätzlichen Meilenstein kurz vor dem Start des Freigabeprozesses für das Durchschreiten des entsprechenden Quality Gates (DB TM). Nur so ist eine Abschätzung (Simulation) seitens des Toleranzmanagements möglich, ob die entworfenen Konzepte über die Gewerke hinweg funktionieren. Hardwareerfahrungen aus Vorgängerbaureihen liegen hier nicht vor. Die Verankerung dieser erarbeiteten Toleranzkonzepte im Datensatz ist zur Informationsbereitstellung für Folgeprozesse zwingend erforderlich. Derzeit erfolgt ein Ausgleich des fehlenden Meilensteines durch ein erhöhtes Kommunikationsaufkommen kurz vor Freigabestart, was jedoch durch den Faktor Mensch Risiken birgt.

### 4.3.3 Prozess zur Sicherung der Konsistenz der Informationskette im Entwicklungsprozess außerhalb des Gewerk Toleranzmanagements

Bei der Betrachtung der zur Erstellung von Toleranzkonzepten notwendigen Informationen fällt die mitunter verspätete Verfügbarkeit relevanter Informationen negativ auf. Die Information wird erst nach dem Durchschreiten des entsprechenden Quality Gates digital fassbar. Zur vollumfänglichen Bewertung des Toleranzkonzepts eines Produkts zum jeweiligen Freigabemeilenstein ist es jedoch sinnvoll, dem Toleranzmanagement entsprechende Informationen vorab zur Verfügung zu stellen. Der Entwicklungsprozess muss diesbezüglich angepasst werden.

#### 4.3.3.1 Digitale Fügefolge und Metadaten im Spann- und Fixierkonzept

Im Produktentwicklungsprozess erfolgt die erste Freigabe (Durchschreiten von QG-F) der Fügefolge mit dem Abschluss der Vorentwicklungsphase (Konzeptphase) [Teck]. Mit Freigabe dieser Fügefolge erfolgt eine Konsistenzprüfung gegen einen ausgewiesenen CAD-Datensatz (Referenzkonfiguration) bzw. bei der Betrachtung von Fügefolgen, die mehrere Derivate beinhalten gegen mehrere ausgewiesene Referenzkonfigurationen. Erforderliche Änderungen werden derzeit erst beim Durchschreiten des nächsten Quality Gate eingearbeitet und geprüft. Abbildung 4.25 zeigt einen überarbeiteten Entwicklungsprozess mit zugrundeliegender, digitaler Fügefolge. Drei zusätzliche Datenbereitstellungspunkte für wiederum drei Hauptaufbaustufen eines Rohbaus (Unterbau, Seitenwand & Dach, Klappen & Anbauteile) schaffen einen höheren Reifegrad zum Zeitpunkt der entsprechenden Freigabe (hier P-Freigabe), da erforderliche Änderungen bereits vor dem eigentlichen Datenbereitstellungspunkt im Datensatz verankert werden können. Durch die gestaffelte Bereitstellung der Fügefolge in den einzelnen Aufbaustufen lassen sich Absicherungssimulationen (z. B. die Schweißzangenzugänglichkeit) früher durchführen. Somit können notwendige Konstruktions- bzw. Anlagenänderungen noch vor der Datenfreigabe erkannt werden.

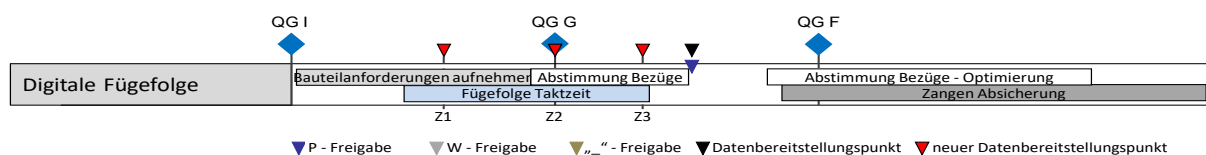


Abbildung 4.25 Entwicklungsprozess mit digitaler Fügefolge

Beim Spann- und Fixierkonzept mit enthaltenen Metadaten erfolgen die entsprechenden Freigabe prozessbeding ähnlich. Auch hier ist eine gestaffelte Datenbereitstellung vor dem eigentlichen, finalen Datenbereitstellungstermin sinnvoll. Hierdurch lassen sich seitens des Toleranzmanagements ausgearbeitete Toleranzkonzepte frühzeitig bewerten, da die erforderlichen Eingangsdaten zum Aufbau der Simulation bereits vorliegen. Abbildung 4.26 zeigt den Entwicklungsprozess bei der Bereitstellung von Metainformationen im Spann- und Fixierkonzept.

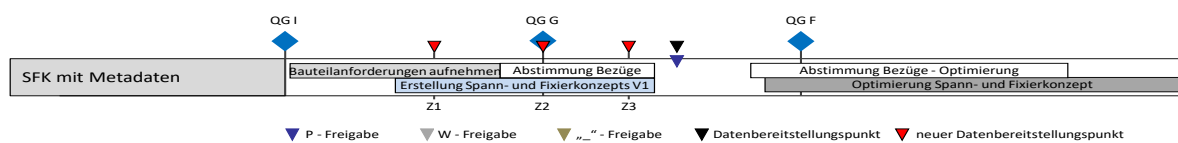


Abbildung 4.26 Entwicklungsprozess SFK mit enthaltenen Metadaten

#### 4.3.3.2 Qualitätssicherung und Messtechnik

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Simulationsmodellen aus dem Digitalen Mockup und den in der Produktionsanlage vermessenen realen Baugruppen und Einzelteilen herzustellen, ist bereits in frühen Phasen eine eindeutige Definition der Messmerkmale notwendig. Wie in Kapitel 2.3.5.1 erläutert, werden die sog. Masterschnitte frühzeitig im Entwicklungsprozess festgelegt. Diese Schnitte sind im weiteren Verlauf die Basis für die Messpunkte. Über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg bleiben die die Positionen dieser Schnitte bestehen, lediglich die den jeweiligen Schnitt umgebende Geometrie kann sich verändern. Derzeitig werden diese Masterschnitte durch das Toleranzmanagement in Kooperation mit der Produktionsplanung sowie der Qualitätssicherung kontinuierlich über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg erarbeitet und gegeben falls durch Schnitte weiterer Gewerke ergänzt. Es ist jedoch durchaus sinnvoll, bereits zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses diese Masterschnitte eindeutig festzulegen und zudem bereichsübergreifend abzustimmen (siehe Kapitel 2.3.5). Diese frühzeitige Abstimmung erfolgt beispielsweise bereits bei der Durchführung des präventiven Toleranzmanagements. So lässt sich feststellen, inwieweit sich die erarbeiteten Konzepte über das digitale Fahrzeug hinaus in der realen Serienproduktion bewähren. Im Sinne des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses besteht zudem die Möglichkeiten der Datenrückführung realer Messdaten in die Toleranzsimulation oder aber einer automatisierten Erstellung von Messspezifikation auf Basis dieser Schnitte. Durch die Verankerung der Schnitte im CAD-System ist die Bereitstellung der Koordinaten dieser

Schnitte durch das Toleranzmanagement jederzeit sichergestellt (siehe Kapitel 2.3.5). Zukünftig ist es also denkbar, diese Masterschnitte digital verwertbar im PDM-System bis zur Freigabe zu archivieren und darauf aufbauend frühzeitig, Messpunkte zu erzeugen. Zwingend notwendig ist dabei eine gewerksübergreifende Mess- und Antaststrategie, um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse trotz verschiedener Produktionsstandorte sicherzustellen. Eine Methodik zur automatisierten Erstellung von Messpunkten basierend auf diesen Schnitten findet sich in Kapitel 4.1.3.

#### **4.3.4 Prozess zur Sicherung der Informationskette im Entwicklungsprozess innerhalb des Gewerks Toleranzmanagements**

##### **4.3.4.1 Fugen- und Radienplan, Funktionsmaßkatalog**

Derzeit erfolgt eine Bereitstellung der Arbeitsergebnisse des Fugen- und Radienplans sowie des Funktionsmaßkatalogs im Produktentstehungsprozess erstmals bei Erreichung des Quality Gates F (siehe Kapitel 2.3.4). Erforderliche Änderungen im Datensatz dieses Dokuments und damit im PDM-System lassen sich heute prozessbedingt nur zum nächsten Quality Gate verbindlich verankern.

Mit dem in Kapitel 4.3.2 eingeführtem Datenbereitstellungstermin TM ist es bei der Durchführung von präventivem Toleranzmanagement möglich, bereits zum QG-F einen relevanten Arbeitsstand des Fugen- und Radienplans bzw. des Funktionsmaßkatalogs bereitzustellen und die Folgeprozesse zu versorgen. Grund dafür ist das Vorliegen eines weitgehend konsistenter Datenstand zum Datenbereitstellungstermin TM. Änderungen an den durch das Toleranzmanagement erstellten Dokumenten können dann bereits beim Durchschreiten des nachfolgenden QGs realisiert werden. Dadurch steigt der Reifegrad der Dokumente Fugen- und Radienplan und Funktionsmaßkatalog.

##### **4.3.4.2 Toleranzinformationen im Datensatz**

Nach aktuellem Stand der Technik (vgl. Kapitel 2.1.7) werden Toleranzinformationen derzeit am 3D Datensatz verankert. Um ein simultanes Arbeiten zu ermöglichen, zieht das Toleranzmanagement bereits zum frühzeitigen Datenbereitstellungstermin die Bauteilgeometrie ab. In diesem Datenstand werden dann seitens des Toleranzmanagements Bezugssysteme sowie Toleranzinformationen modelliert. Trotzdem kann die Konstruktionsabteilung unverändert am Datensatz weiterarbeiten. Zum QG-F erfolgt dann die

Bereitstellung der Datensätze an die Konstruktionsabteilung. Durch die Synchronisation der Toleranzinformationen mit den (möglicherweise) geänderten Datensätzen der Konstruktionsabteilung sind zum Freigabezeitpunkt alle notwendigen Informationen im freigegebenen Datensatz verankert [Fass].

Ein zusätzlicher Datenbereitstellungstermin TM, wie er beim Durchführen von präventivem Toleranzmanagement notwendig ist, ist auch hinsichtlich des Reifegrads der Toleranzinformationen hilfreich. Bei weitreichenden Bauteiländerungen ist heute die Synchronisation aller Toleranzinformationen aus dem Datenabzug des Toleranzmanagements mit der Bauteilgeometrie der Konstruktionsabteilung nicht möglich. Eine zusätzliche Abstimmungsschleife zwischen Konstruktion und Toleranzmanagement ist gängig, was wiederum die erneute Aktualisierung der Geometrie erfordert. Der Abstimmungsaufwand kann also durch den zusätzlichen Datenbereitstellungstermin drastisch minimiert werden.

#### **4.4 Systemtechnische Umsetzung des Konzepts**

Nachfolgend erfolgt die Beantwortung der Forschungsfrage **System 1**.

Die Umsetzung des im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Konzepts erfordert eine durchgängig kohärente IT-Systemlandschaft. Hierbei kann das PDM-System die zentrale Rolle spielen. Darin eingebettet sind Modulbausteine wie ein CAD-System, ein CAM-System, eine Toleranzsimulationssoftware sowie Qualitätsmanagementsysteme und Simulations- sowie Optimierungsprogrammsysteme. Allen gemein ist das Vorliegen einer gemeinsamen Schnittstelle zum PDM-System besitzen. Nur so kann der verlustfreie Datenaustausch sichergestellt werden. Hierzu kommen Formate wie JT (Jupiter Tessellation) oder STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) zum Einsatz. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die bedarfsgerechte Datenstrukturierung innerhalb des PDM-Systems. Nur so kann sichergestellt werden, dass die angebundenen Systeme ihre erforderlichen Informationen erhalten. So erfordern Produktsicht (BOM) und Produktionssicht eben unterschiedliche Datenstrukturen. Die Bereitstellung der jeweiligen relevanten Ansicht ist die Aufgabe des PDM-Systems. Auch innerhalb des standardisierten Austauschformats muss mithilfe des PDM-Systems eine bedarfsgerechte Filterung möglich sein. So lassen sich beispielsweise die CAD-Daten auf Mittelflächen und Verbindungstechnik sowie Materialinformationen reduzieren. Die entspricht den Anforderungen der FEM-Software. Das CAM-System benötigt hingegen

Umfänge wie Verbindungstechnik und die Produktsicht zur Planung der Produktionszellen. Dagegen benötigt die Toleranzsimulationssoftware Informationen wie den Fügegraphen (Produktionssicht), CAD-Daten wie Geometrieinformationen und Toleranzinformationen sowie CAM-Daten (Spann- und Fixierkonzept, Verbindungstechnik). Bei der bedarfsgerechten Filterung müssen die Informationen bereits so aufbereitet sein, dass die Toleranzsimulationssoftware das Modell entsprechend erstellen und anschließend berechnen kann. Folglich ist im Falle einer statisch bestimmten Simulation ein entsprechender Reduzierungsalgorithmus - wie in Kapitel 0 dargestellt - im Datenbereitstellungsfiler des PDM-Systems hin zum CAT-System zu hinterlegen. Soll eine Optimierung von Eingangsparametern des Toleranzsimulationsmodells erfolgen, so muss dies dem Filter des PDM-CAT-Systems mitgeteilt werden. Durch die direkte Schnittstelle kann dann das Optimierungsprogrammssystem einbezogen werden. Abbildung 4.27 zeigt das übergeordnete Konzept in einer idealen Systemlandschaft (siehe ①) sowie das darin verankerte Konzept zur Optimierung von dünnwandigen Blechbauteilen im Karosserierohbau mithilfe von Toleranzanalysen (siehe ②).

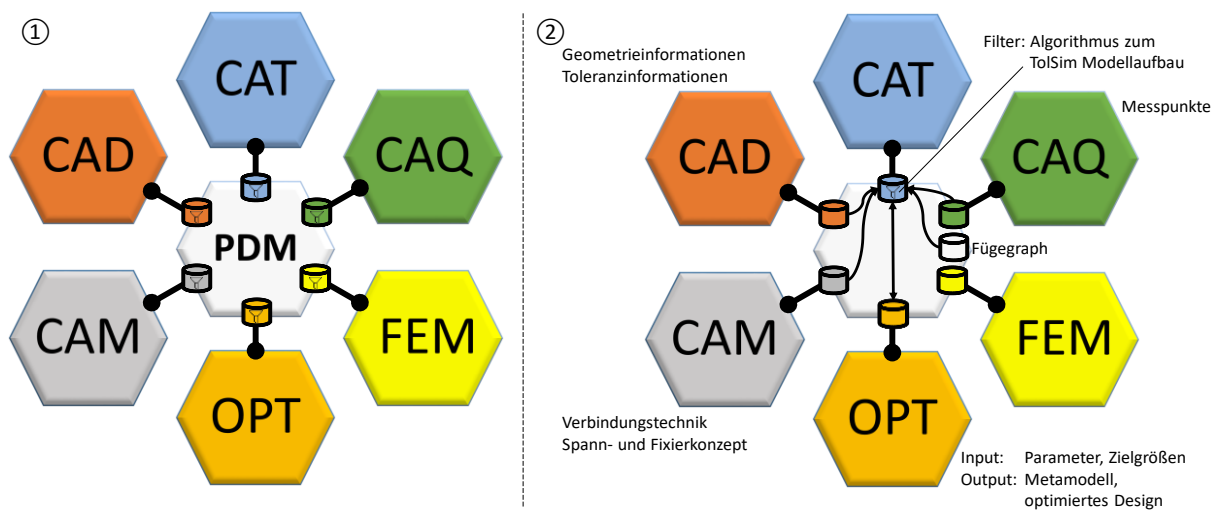


Abbildung 4.27 Ideale Systemlandschaft des vorgestellten Konzepts



## 5 Herausforderung bei der Umsetzung in bestehenden Systemlandschaften

Bei der Umsetzung des in Kapitel 4 beschriebenen Konzepts gilt es, einige durch bereits bestehende Systemlandschaften bestehend Randbedingungen zu beachten. Deswegen ist es notwendig, das in Kapitel 0 aufgezeigte Konzept an die lokalen Gegebenheiten anzupassen. Das im Rahmen dieser Doktorarbeit entwickelte Konzept soll im Entwicklungsumfeld Karosserierohbau der Daimler AG seine praktische Anwendung finden. Aus diesem Grund wird zunächst ein Überblick über die vorhandenen softwaretechnischen Lösungen gegeben. Als PDM-System kommt das Siemens Teamcenter basierte System Smaragd zum Einsatz, welches eine Eigenentwicklung der Daimler AG darstellt. Als CAD-System kommt Siemens NX zur Anwendung. Innerhalb dieses CAD-System finden die die Erstellung der Spann- und Fixierkonzepte sowie die Modellierung der Messpunkte statt. Die Auswertung der Messpunkte an realen Fahrzeugen geschieht dagegen in Pi-Web System der Zeiss AG. Das Toleranzanalysestystem ist 3DCS der Firma DCS. Als Optimierungsprogrammssystem wurde optiSLang der Firma Dynardo GmbH gewählt. Diese komplexe Systemlandschaft bringt einige praktische Einschränkungen für das Toleranzmanagement mit sich, die im Folgenden angesprochen werden.

Die CAM-Informationen werden im PDM-System zwar archiviert, weisen jedoch keinerlei Assoziativität zum Datensatz auf, wodurch diese bei jeder Datenänderung aktualisiert werden müssen. Der Fügegraph (Produktionssicht) wird im PDM-System nicht dargestellt. Es existiert innerhalb der Daimler AG lediglich Dokumente im Office-Format, welche die Fügefolge dokumentieren [Burr].

Da keine direkte Anbindung des CAT-Systems gegeben ist, müssen CAD-Modelle sowie die zum Simulationsaufbau notwendigen Informationen (Punkte, Toleranzen etc.) aufwendig manuell ins CAT-System transferiert werden. Weiterhin existiert auch zum Optimierungsprogrammssystem keine direkte Schnittstelle (siehe dazu ① in Abbildung 5.1). Zur Umsetzung des Konzepts der Optimierung von dünnwandigen Blechbauteilen im Karosserierohbau mithilfe von Toleranzanalysen wurde deshalb eine externe Applikation entwickelt. Diese greift aus den Systemen CAD, CAM, PDM (Fügefolge) erforderliche Informationen zum Aufbau der Toleranzanalysemodelle ab (XML-basiert). Anschließend



verfügt die Applikation über den in Kapitel 0 erwähnten Algorithmus zur Reduktion der Informationen, sodass ein lauffähiges Simulationsmodell entstehen kann (XML-ähnliches Simulationsmodell). Zudem kann die Applikation durch einen Batch-Call das Toleranzsimulationsmodell an die CAT-Software übergeben und Simulationsergebnisse zurückgewinnen (Excel). Ebenso können innerhalb der Applikation Parameter sowie Zielgrößen für eine Optimierung definiert werden. Durch den Aufbau entsprechender Skripte kann so das Optimierungsprogramm angesprochen und Variationsanalysen oder Optimierungen durchgeführt werden (Python Skripte). Auch hier lassen sich die Ergebnisse in die Applikation rückführen (siehe auch ② in Abbildung 5.1).

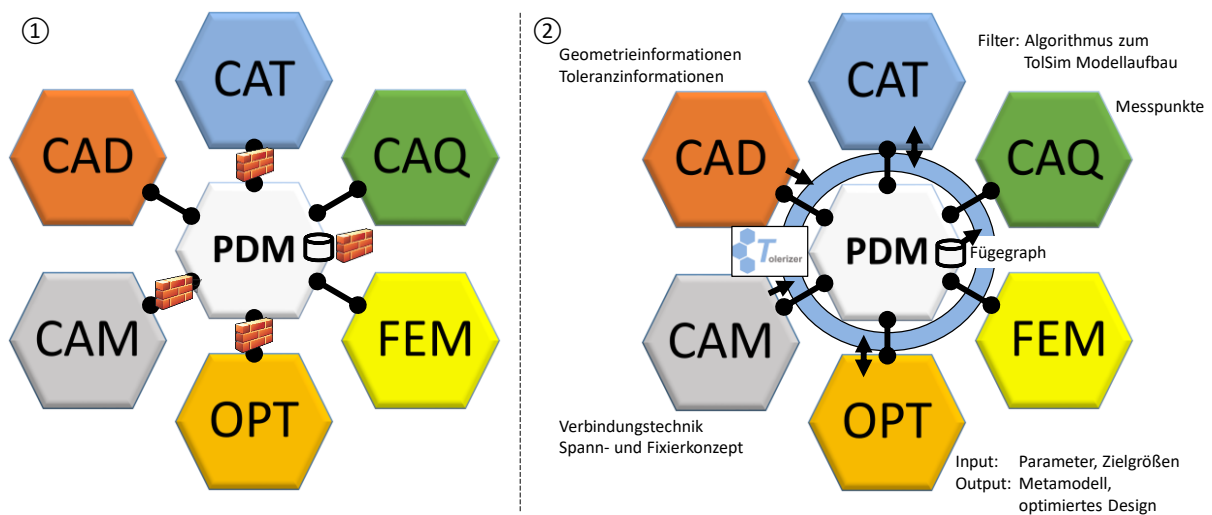


Abbildung 5.1 Herausforderungen bei der Umsetzung des Konzepts in bestehenden Systemlandschaften

## **6 Konzeptvalidierung des Ansatzes zur automatisierten Toleranzsimulationsmodellerstellung**

Zur Validierung der erarbeiteten Methoden aus Kapitel 4 wird nachfolgend ihre Umsetzung in der Daimler Systemlandschaft näher erläutert. Zunächst wird dabei mit einer Erläuterung der vorherrschenden Systemlandschaft im Bereich Toleranzmanagement. Anschließend erfolgt die Vorstellung der Methoden, die zur automatisierten Durchführung von Toleranzsimulationen erforderlich sind.

### **6.1 Konzept zur Umsetzung im produzierenden Unternehmen am Beispiel der Daimler AG**

Die Umsetzung des in Kapitel 4 dargestellten Konzepts zur automatisierten Toleranzsimulationsmodellerstellung soll am Beispiel der Systemlandschaft der Daimler AG erfolgen. Der punktbasierte Toleranzsimulationsmodellenaufbau aus Kapitel 2.3.6 findet bereits im Karosserierohbau Anwendung. Als Backbone des Produktdatenmanagements existiert innerhalb der Daimler AG das teamcenterbasierte PDM-System Smaragd. Hier erfolgt die zentrale Archivierung und Bereitstellung der Produkt- und Prozessdaten. Zur Konstruktion von Produktdaten ist das CAD-System Siemens NX angebunden. Bei der Toleranzanalyse im Karosserierohbau kommt die eigenständige CAT-Software 3DCS zum Einsatz. Hier besteht allerdings keine direkte Anbindung zum PDM- oder CAD-System. In Abbildung 6.1 wird das Konzept zur Umsetzung einer automatisierten Toleranzsimulationsmodellerstellung aus vorhandenen Produkt- und Prozessdaten dargestellt.

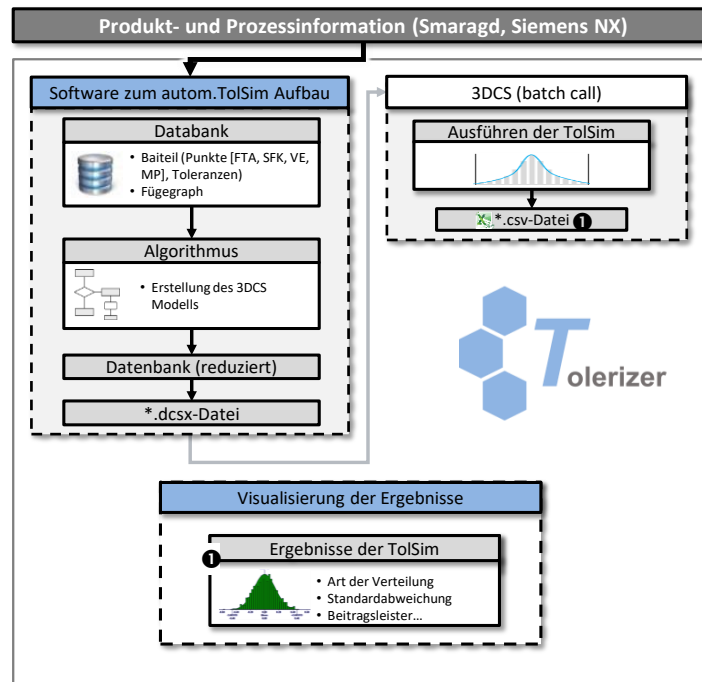


Abbildung 6.1 Konzept zur automatisierten Toleranzsimulationsmodellerstellung aus vorhandenen Produkt- und Prozessdaten

Zunächst werden aus dem aus dem CAD- und PDM-System die Daten abgezogen. Diese Daten fließen in die Datenbank der Software zur automatisierten Toleranzsimulationsmodellerstellung ein (Tolerizer). Nachdem die zu messenden Qualitätsmerkmale definiert worden sind, kommt innerhalb der Software ein Algorithmus zum Einsatz, der die Datenbank reduziert und ein lauffähiges Toleranzsimulationsmodell generiert. Im vorliegenden Beispiel wird ein 3DCS Modell im XML-basierten \*.dcsx-Format generiert. Dieses Modell kann mittels Batch-Call in 3DCS simuliert werden, sodass im Anschluss innerhalb der Software „Tolerizer“ die Ergebnisse der Simulation dargestellt werden können (siehe auch 1 in Abbildung 6.1).

## 6.2 Digitale Fügefolge

Grundlage für das Simulationsmodell ist die Fügefolge. Das in Kapitel 4.1.1 dargestellte Konzept zur digitalen Bereitstellung der Fügefolge wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

### 6.2.1 Grundgerüst der digitalen Fügefolge in der Daimler Systemlandschaft

Das in Kapitel 4.1.1 dargestellte Grundgerüst einer AML Struktur besteht aus einer Rollenklassenbibliothek, die die Darstellung des AML Formats in den Rollen Produktsicht, Prozesssicht sowie Ressourcensicht ermöglicht. Ferner wird in der Systemeinheitsbibliothek

die entsprechende Strukturierungsvorgabe einer solchen Sicht dargestellt. In der Schnittstellenbibliothek ist beschrieben, inwiefern die verschiedenen Attribute und Klassen miteinander in Beziehung gebracht werden können. Verglichen mit Standard XML-Elementen erfolgt bei AML die Erweiterung um Attribute, sodass man von AML-Klassen sprechen kann. Für die Fügefolge steht dabei die Klasse InstanceHierarchy. Unter dieser sind alle benötigten Informationen über weitere Klassen (Bez.: <InternalElement>) aufgeführt. Die <InstanceHierarchy> gliedert sich in zwei Teile. Der erste Teil ist die Repräsentation der Prozessstruktur, der zweite Teil weist der Prozessstruktur die verwendeten Bauteile (A-SNR) zu. Für diese beiden Bereiche ist je eine andere Rollenklasse (<RoleRequirements>) definiert. Abbildung 6.2 zeigt die entsprechende Zuordnung.

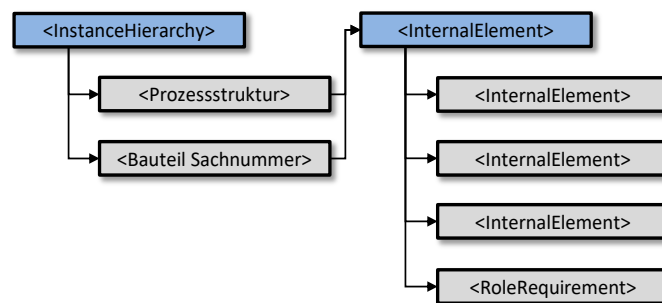


Abbildung 6.2 Zergliederung der InstanceHierarchy in die Teile Prozessstruktur sowie der dabei verwendeten Komponenten im zweiten Teil

### 6.2.1.1 Analyse der Prozessstruktur

Zur Analyse der Prozessstruktur müssen aus dem <InternalElement> die folgenden Attribute ausgelesen werden. Der Name der entsprechenden Fügestufe (z. B. Stationsbezeichnung) sowie der Name des SFK-Modelles. Dabei sind über die Schnittstellenbibliothek (ExternalInterfaces) logische Schlüsse sowohl auf den Nachfolgeprozess als auch auf das Vorgängerbauteil möglich. Außerdem befinden sich in der Schnittstellenbibliothek für die Fahrzeugkonfiguration aus dem PDM-System relevante Attribute wie Einbaulage, Einlegereihenfolge und Stempelung. So kann sichergestellt werden, dass aus der Vielzahl an Fügefolgevarianten (z. B. Abbildung verschiedener Derivate, Ländervarianten, Linkslenker, Rechtslenker), welche sich in einer AML finden, die baubare Konfiguration aus dem PDM-System zugeordnet wird. Es wird also beispielsweise vermerkt, dass es sich bei dem verwendeten Teil um ein Bauteil einer Limousine mit Volldach in der US-Variante handelt. Beim späteren Aufbau einer Simulation erfolgt dann die explizite Auswahl einer Konfiguration,

sodass gezielt aus den benötigten Teilen ein Fügegraph entwickelt werden kann. Abbildung 6.3 zeigt die Attribute der AML, die zum Aufbau des Fügegraphen ausgelesen werden müssen.

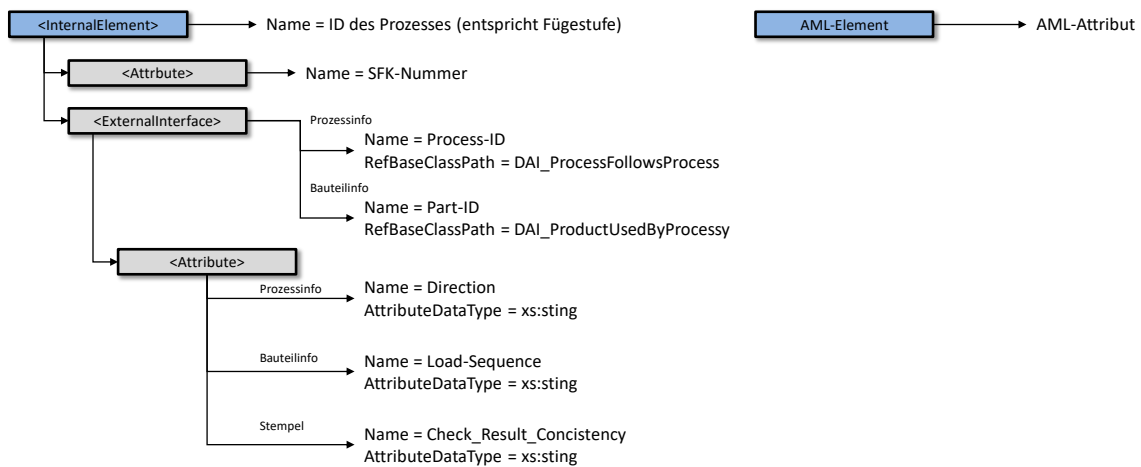


Abbildung 6.3 Notwendige Attribute der AML zum Aufbau des Fügegraphen

Die Zuordnung der Bauteil ID zur entsprechenden Sachnummer wird mittels des Attributes **<PartNumber>** sichergestellt (siehe Abbildung 6.4).

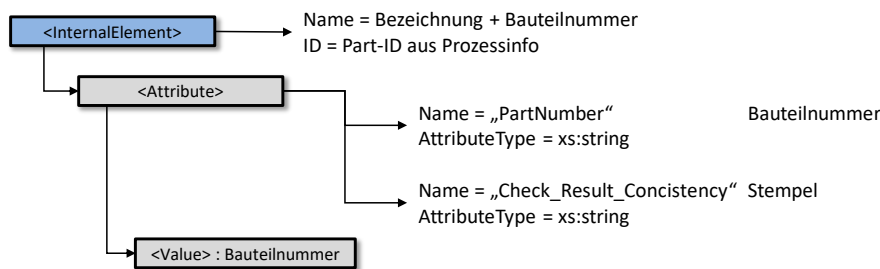


Abbildung 6.4 Zuordnung der Bauteil ID zur Bauteilsachnummer

Damit kann ein Fügegraph aufgebaut werden. Die Struktur dieses Fügegraphen in der Daimler Systemlandschaft zeigt nachfolgendes Kapitel.

## 6.2.2 Struktur des Fügegraphen in der Daimler Systemlandschaft

Nachdem die erforderlichen Attribute zur Erstellung eines Fügegraphen ausgelesen sind, müssen diese in eine weiterverwendbare Klassenstruktur gebracht werden. Dazu erfolgt der Aufbau einer Parent-Child-Beziehung. Eine Fügestufe wird durch eine Klasse repräsentiert, **<parentchild>**. In dieser werden der erzeugte Zusammenbau (**<parent>**), die zugehörigen Unterbaugruppen und Bauteile (**<child>**) sowie die notwendige Spanntechnik (SFK) aufgeführt. Durch die Verwendung der ausgelesenen IDs ist es dann die Erzeugung einer 1 zu  $n$  Beziehungsliste möglich. Für den Fall, dass es an einem Knoten des Fügegraphen mehrere

Bauteilsachnummern gibt (z. B. bei länderspezifischen Teilen) hilft die hinterlegte Stempelung der expliziten Konfiguration. Mithilfe dieser Stempelung lässt sich dann wiederum eine eindeutige 1 zu  $n$  Beziehungsliste erzeugen. Abbildung 6.5 zeigt die erzeugte Klassenstruktur.

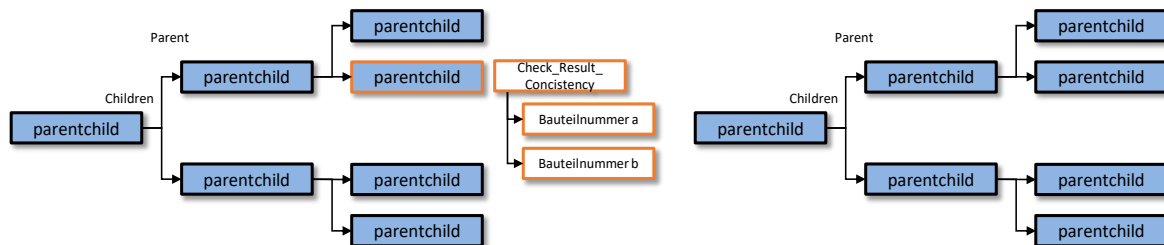


Abbildung 6.5 Klassenstruktur der Fügefolge

Die Bündelung dieser Klassenstruktur erfolgt innerhalb der Hauptklasse <Fügefolge>, die wiederum zwei Attribute beinhaltet. Eine Liste mit Fügestufen wird repräsentiert durch die Klasse <parentchild> sowie einen String, der auf den obersten Knoten des Fügegraphen verweist. Abbildung 6.6 zeigt diese Hauptklasse.

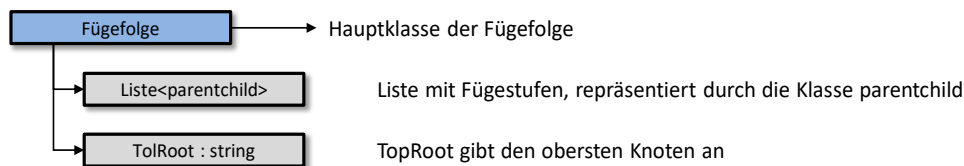


Abbildung 6.6 Hauptklasse <Fügefolge>

Die Fügestufenklasse <parentchild> gliedert sich dabei folgendermaßen. Ein Attribut trägt die Stationsbezeichnung der Fügestufe. Ein weiteres Attribut beinhaltet den in dieser Fügestufe entstehenden Zusammenbau. Im Attribut <List<child>> finden sich sämtliche beim Zusammenbaus notwendigen Bauteile sowie deren Einlegereihenfolge an der betreffenden Fügestation. Das Attribut <List<SFK>> beinhaltet die in der Fügestufe verwendete Spanntechnik. Im Attribut <TopRoot> wird hinterlegt, ob es sich bei der dargestellten Fügestufe um den obersten Fügeknoten des betrachteten Umfangs handelt. Abbildung 6.7 zeigt die <parentchild> Klasse mit ihren Attributen.

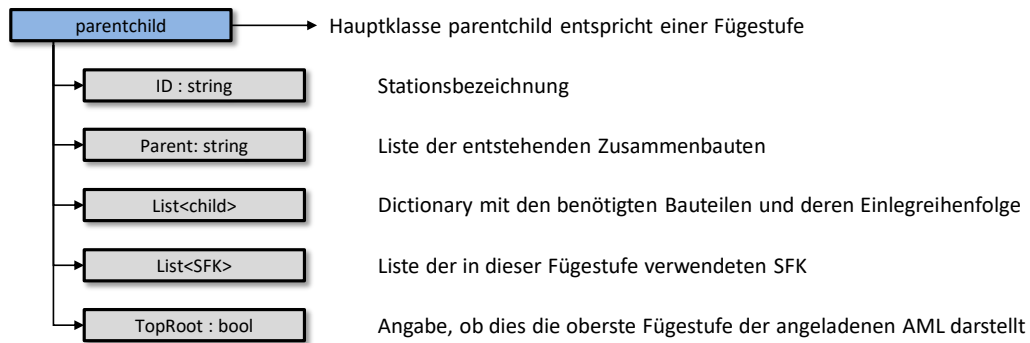


Abbildung 6.7 &lt;parentchild&gt; Klasse

Zur Generierung einer Fügefolge innerhalb der dargestellten Struktur sind die folgenden Schritte notwendig:

- Parsen der AML-Datei und transformieren der ausgelesenen Elemente in ein Zwischenformat (Zusammenhang über IDs)
- Sortierung der ausgelesenen Informationen zu <parentchild> Instanzen.
- Aufbau der Fügefolge auf Basis der <parentchild>-Instanzen, der Einlegereihenfolge und Ableitung eines ID-basierten (<parentchild>-ID) Beziehungsbaum

Ist die Fügefolgestruktur komplett aus dem AML-Prozess ausgelesen, werden die Bauteil-IDs ihren Sachnummern zugeordnet.

Damit steht eine digital auswertbare Fügefolge zur Verfügung. Diese bildet die Basis zum weiteren Aufbau der Toleranzsimulationsmodelle.

### 6.3 Digitale Qualitätsmerkmale

Neben dem Fügegraphen bildet das Qualitätsmerkmal einen weiteren Bestandteil beim Aufbau einer Toleranzkette. Das Qualitätsmerkmal gliedert sich in optische (Fugen- und Versatzmaße) und funktionale (Funktionsmaße) Maße. Eine Methode zur Bereitstellung dieser Maße im Sinne des 3D-Master Ansatzes der Daimler AG aus Kapitel 4.1.3 wird nachfolgend dargestellt.

#### 6.3.1 Namenskonvention der Qualitätsmerkmale

Um eine eindeutige Identifizierung der Qualitätsmerkmale zu erreichen, wird zunächst ihre einheitliche Benennung festgelegt. Ein Präfix „DQM“ (siehe Abbildung 6.8) erlaubt die eindeutige Zuordnung aller dem Qualitätsmerkmal zugeordneten Informationen. Gefolgt wird

dieses Präfix von einem Zusammenbaukenner, der die Verbindung zum Gesamtprojekt herstellt (z. B. Aufbaustufen Z1, Z2, Z3...). So kann sichergestellt werden, dass bei der Auflistung der Qualitätsmerkmale die Funktionsgruppen eines Zusammenbaus untereinander erscheinen. Anschließend folgt ein Kenner, der die Funktionsgruppe des Qualitätsmerkmals beschreibt (Funktionsmaßkenner, Fugenmaßkenner). Der Name der Funktionsgruppe dient der Beschreibung der Funktion und ermöglicht somit die Differenzierung der einzelnen Funktionsgruppen.



Abbildung 6.8 Benennung der Funktionsgruppen

### 6.3.2 Einbindung in die Daimler Systemlandschaft

Zur Prüfung der Umsetzbarkeit des Konzepts ist der in Abbildung 6.9 dargestellte Demonstrator erstellt worden. Basierend auf dieser Baugruppe sind verschiedene Machbarkeitsanalysen durchgeführt worden. Bei der Auswahl der Baugruppe fanden folgende Kriterien Berücksichtigung:

- in sich geschlossener Umfang
- begrenzte Datenmenge
- Spiegelbauteile vorhanden
- baugruppenübergreifende Qualitätsmerkmale möglich



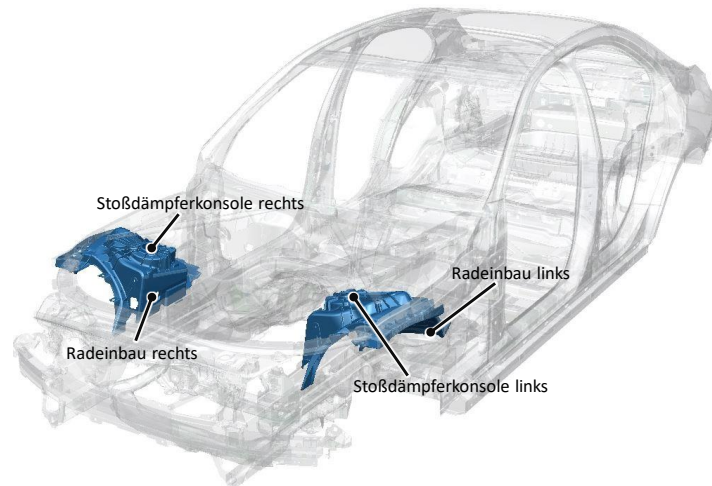


Abbildung 6.9 Exemplarischer Demonstratorumfang; Radeinbau vollständig

Der Umfang umfasst zehn Bauteile und circa 45 Funktionsmaßspezifikationen. Um systemabhängige Einflüsse ausschließen zu können, muss ein solches Modell sowohl Spiegelbauteile als auch verschiedene Baugruppen beinhalten. Durch die zwei Zusammenbauten (Radeinbau links und rechts) können baugruppenübergreifende Funktionsmaße erzeugt werden, was die Überprüfung von Einflüssen der Zusammenbaustruktur ermöglicht. Weiterhin liegt auch dem Aufbau von Fugen- und Versatzmaßen eine baugruppenübergreifende Maßezeugung zu Grunde, wodurch die Darstellung an einem gesonderten Demonstrator für Fuge- und Versatzmaße überflüssig wird. Der definierte CAD-Umfang wird auf das CAD-System Siemens NX und die konzernspezifischen Gegebenheiten übertragen. Um den realen Prozess bestmöglich nachzustellen, ist der Eintrag der Funktionsmaße in das oben genannte Modell nötig. Die Eintragung basiert dabei auf dem in Kapitel 4.1.3 konzipierten Datenkonzept (Produktsicht, d.h. ein Qualitätsmerkmalbauteil pro Aufbaustufe). Abschließend erfolgt die Integration des Qualitätsmerkmalbauteils in das Daimler PDM-System SMARAGD.

### 6.3.2.1 Einbindung ins CAD-System Siemens NX

Beim Überführen der PDM-Struktur nach Siemens NX entsteht die in Abbildung 6.10 dargestellte Struktur. Das Geometriepart des Qualitätsmerkmalbauteils beinhaltet die Geometrie, die zur Erstellung des Qualitätsmerkmals nötig ist, sowie die zugehörigen PMIs mit der Toleranzinformation.

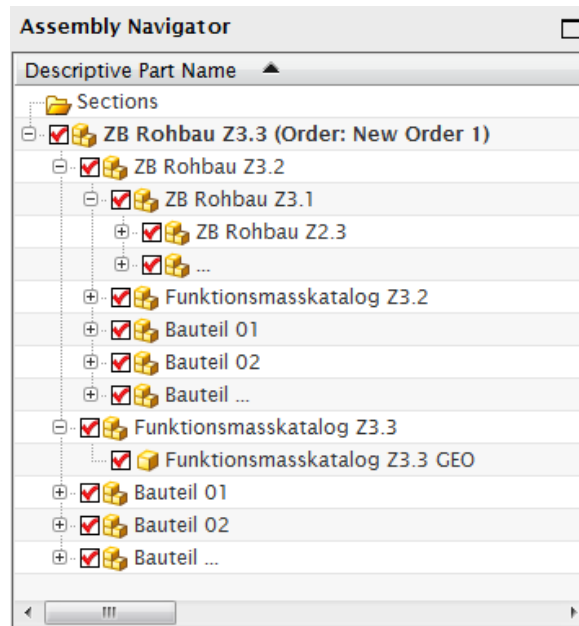


Abbildung 6.10 Exemplarische Montagesicht mit Funktionsmaßkatalogen in Siemens NX

### 6.3.2.2 Strukturelemente bei der Tolerierung mit Siemens NX

Beim Einsatz eines bestimmten CAD-Systems kommen zusätzlich zu den bereits beschriebenen Elementen oft noch systemspezifische Geometrie- und Strukturierungselemente hinzu. Dies sind im Fall des digitalen Qualitätsmerkmalkatalogs unter Siemens NX:

- Feature Groups: WAVE-Links, Hilfsgeometrie
- Model View: PMI
- Reference Set: Sichtensteuerung der Hilfsgeometrie im Zusammenbaukontext

Wie bereits erwähnt, sollen die Referenzelemente für den Qualitätsmerkmalkatalog verlinkt werden (CAD- Links [Bril]). Um die einzelnen WAVE-Link-Features (Bezeichnung in Siemens NX) zu sortieren, kann eine Featuregroup verwendet werden. Abbildung 6.11 zeigt eine Sortierung der externen Referenzen in der Feature Group „External\_References“.

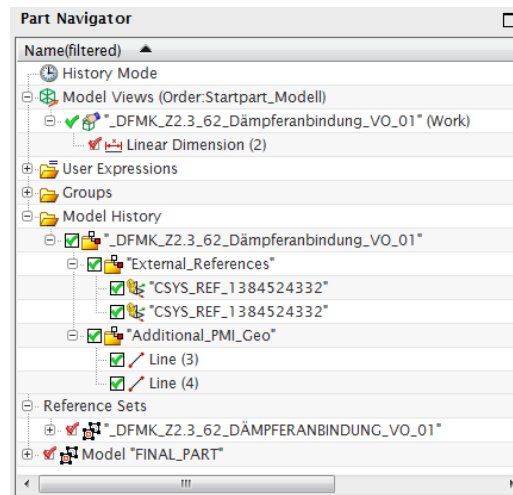


Abbildung 6.11 Mindestumfang der Strukturelemente bei der Tolerierung mit Siemens NX

Bei der Erzeugung von Hilfsgeometrie, wie das abgeleitete Geometrieelement zur Tolerierung einer Bohrungsachse (Abbildung 6.12), werden weitere Features erzeugt. Auch diese sollten aus Übersichtsgründen in einer Featuregroup gebündelt werden. In Abbildung 6.12 sind die Features in der Feature Group „Additional\_PMI\_Geo“ zusammengefasst.

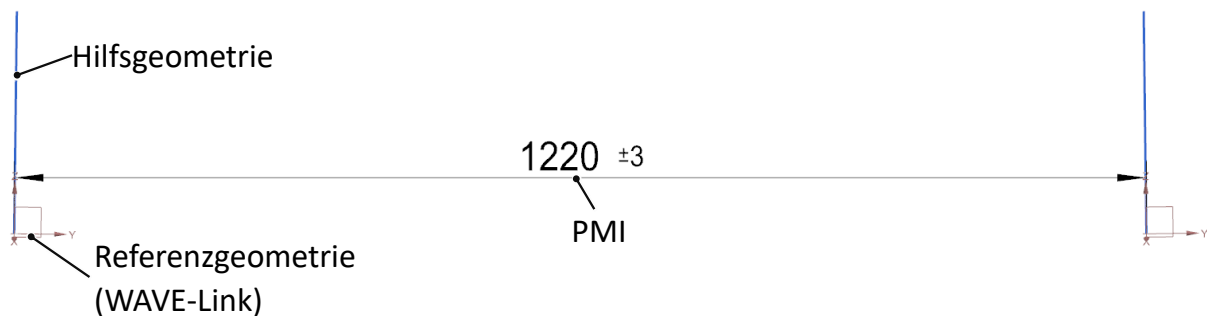


Abbildung 6.12 Funktionsmaßelemente zur Tolerierung des Abstandes zweier Bohrungsachsen

PMIs können in Siemens NX nur in einer Model View abgelegt werden. Diese speichert nicht nur welche PMIs visualisiert werden, sondern auch die aktuelle Transformationsmatrix der eingestellten Ansicht. Bei aktiver Model-View können PMIs erzeugt werden. In Abbildung 6.9 wird beispielsweise ein Längenmaß toleriert. Das PMI des Längenmaßes ist dem mit „(Work)“ gekennzeichneten Model-View zugeordnet. Da es sich dabei um die Tolerierung zweier Bohrungsachsen handelt (Abbildung 6.9), müssen die Achsen – dargestellt durch „Line (3)“ und „Line (4)“ (Abbildung 6.9) – im Zusammenbaukontext angezeigt werden. Dazu hilft das Reference Set, dem die anzuzeigenden Geometrieelemente zugewiesen sind. Abbildung 6.9 zeigt die Tolerierung des Abstandes zwischen zwei Bohrungsachsen mit einem Längenmaß. Dieser Umfang umfasst alle Elemente zur vollständigen Dokumentation nach der 3D-Mastermethode. Zur besseren Übersicht werden die beiden entstehenden Feature Groups in

einer übergeordneten Feature Group zusammengefasst und diese mit einem eindeutigen Namen (vgl. Kapitel 6.3.1) versehen. Die Übertragung der Benennung auf den Model-View und das Reference Set macht die Zusammengehörigkeit dieser drei Elemente ersichtlich. Dadurch kann das Funktionsmaß der Dämpferanbindung vorne dargestellt werden.

### 6.3.2.3 Einbindung in das Daimler Startpart

Der im vorhergehenden Kapitel dargestellte Mindestumfang für die Erstellung technischer wie optischer Funktionsmaße muss nun in das Daimler-Startpart überführt werden. Dazu helfen die in Abbildung 6.13 dargestellten Strukturen. Die bereits im Startpart vorhandenen Elemente werden für jede Funktionsgruppe wie folgt ergänzt:

- Feature Groups: „\_DQM\_Z...“, „External\_References“, „Additional\_PMI\_Geo“
- Model-View
- Reference Set

Zur zentralen Archivierung der erforderlichen Hilfsgeometrie zur Darstellung von PMI-Informationen dient innerhalb des Daimler-Startparts die Feature Group „\_PMI\_Sichten“. Diese wird im weiteren Verlauf als Bündler für die einzelnen Feature Groups der jeweiligen Qualitätsmerkmale dienen. Um mehrere Qualitätsmerkmalgruppen in einer Datei speichern zu können, wird zusätzlich die Feature Group „\_DQM“ übergeordnet. Diese ist nicht Umfang des Daimler-Startparts, wird aber trotzdem als Gruppe für alle qualitätsmerkmalrelevanten Features genutzt. Diese Feature Group wird zur Unterscheidung des Funktionsmaßkatalogs sowie des Fugenplanumfangs von anderen toleranzspezifischen Umfängen verwendet. (z. B. Einzelteiltoleranzen, Zusammenbautoleranzen).

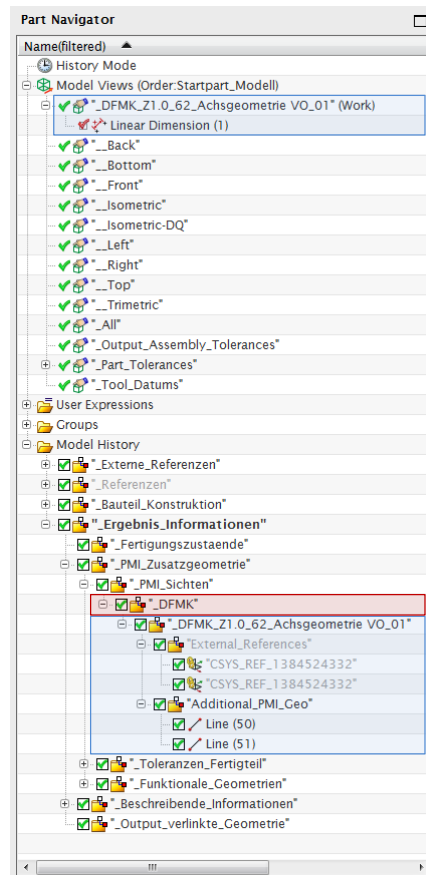


Abbildung 6.13 Einbindung der Funktionsmaßstruktur in das Daimler Startpart

Zur besseren Maschinenlesbarkeit erfolgt das Hinterlegen von Attributen in den generierten Featuregroups. Mithilfe der in Kapitel 6.3.1 vergebenen ID kann so über eine Anwendung gezielt die entsprechende Feature Group angesprochen und deren Inhalte verarbeitet werden. Ein Verschieben oder Umbenennen der FeatureGroup durch den Nutzer hat dabei keinerlei Auswirkungen. Abbildung 6.14 zeigt die für die einzelnen digitalen Qualitätsmerkmale vergebenen IDs.

Title/Alias	Value
<No Category>	
DFMK_ID	0000

Abbildung 6.14 DQM\_ID-Attribut der Feature Group “\_DQM”

### 6.3.3 NX AddOn zur Erstellung der digitalen Qualitätsmerkmale

#### 6.3.3.1 NX AddOn zur Erstellung der bauteilinternen Struktur

Um Übertragungsfehler bei der Namensgebung sowie bei der Einordnung in die Struktur auszuschließen, sollen die in Kapitel 6.3.2. erwähnten Strukturelemente durch ein Zusatzprogramm in Siemens NX automatisiert erzeugt werden. Bei allen Fahrzeugen und

Fahrzeugvarianten treten zahlreiche unterschiedliche Fugen- Versatz- und Funktionsmaße auf. Deswegen wurde als Datengrundlage für die Anwendung eine XML-Datenbank mit häufig wiederkehrenden Qualitätsmerkmalen kreiert. Diese Datenbank spart Zeit bei der Erstellung von digitalen Qualitätsmerkmalen. Außerdem bildet die Datenbank die Basis für einen einheitlichen maschinenlesbaren Standard. Vergleiche zwischen verschiedenen Baureihen sind dadurch einfacher durchführbar. Basis für die Qualitätsmerkmaldatenbank bildet ein XML-Format. Die Repräsentation des XML-Formats übernimmt die Anwendung. Zusätzliche baureihenspezifische Umfänge können ebenfalls in das XML Format gespeichert werden. Durch die strikte Trennung der Information im separaten XML ist es möglich, den sich ständig ändernden Fahrzeuganforderungen gerecht zu werden. eine simple Anpassung des generischen XMLs nötig. Eine erste Datenbank wurde mithilfe eines Vergleichs von Qualitätsmerkmalen verschiedener Baureihen erstellt.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="true"?>
- <ArrayOfFunktionalGroup xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  - <FunktionalGroup>
    <ID>0001</ID>
    <level>Z2.3</level>
    <key>63</key>
    <name>2te LTE Motorhaube Kotflügel</name>
  </FunktionalGroup>
  - <FunktionalGroup>
    <ID>0002</ID>
    <level>Z2.3</level>
    <key>63</key>
    <name>Kastenöffnung_LI_RE</name>
  </FunktionalGroup>
  - <FunktionalGroup>
    <ID>0024</ID>
    <level>Z1.0</level>
    <key>61</key>
    <name>Motorlager Gelenkwelle</name>
  </FunktionalGroup>
</ArrayOfFunktionalGroup>
```

Abbildung 6.15 XML-Struktur Funktionsgruppen

Wie bereits erwähnt, wird die Repräsentation der Daten in Siemens NX durch die Benutzeroberfläche einer Anwendung übernommen. Hierzu wird ein NXOpen-User-Interface-Block verwendet. Wie in Abbildung 6.15 zu sehen, sind die Daten nach Aufbaustufen unterteilt. Durch die Darstellung als Baumstruktur lässt sich der gesamte Inhalt einer Aufbaustufe ausblenden, was bei einer größeren XML-Datei sinnvoll ist, um die Übersicht über die Funktionsmaßgruppen zu behalten. Die den Aufbaustufen untergeordneten Funktionsgruppen sind in Verbindung mit ihren Eigenschaften dargestellt. Bei Tolerierung eines baureihenspezifischen Umfangs ist die Erstellung einer neuen Funktionsgruppe möglich. Über ein Drop-Down-Menü kann die jeweilige Aufbaustufe ausgewählt werden. Der

Konstruktionsgruppenschlüssel wird automatisch aus der Sachnummer des selektierten Bauteils ausgelesen und im Dialog eingetragen; somit ist nur noch der Name der Funktionsgruppe oder die Fugenbenennung einzugeben. Beim Bestätigen des Dialoges wird automatisch eine neue ID für die Funktionsgruppe / Fugenbenennung generiert. Dabei wird die Funktionsgruppe / Fugenbenennung in die Tree List im Hauptfenster eingetragen. Somit kann mit der selbst erzeugten Funktionsgruppe / Fugenbenennung wie mit einer vordefinierten Funktionsgruppe / Fugenbenennung aus der Datenbank weitergearbeitet werden.

## **6.4 CAD-Datengrundlage zur automatisierten Erstellung von Toleranzsimulationsmodellen**

Die zum Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen notwendigen Informationen finden sich nach der 3D-Master Methode im 3D-CAD Datensatz. Im Falle der Daimler AG kommt hier das CAD-System Siemens NX zum Einsatz.

### **6.4.1 Startmodell / Strukturierungsvorgaben der Daimler AG in Siemens NX**

Grundsätzlich ist das Startmodell der Daimler AG im CAD-System Siemens NX nach dem EVA-Prinzip aufgebaut [Reus]. Die erste Strukturebene zur Informationsgliederung ist also in die Bereiche Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe untergliedert. Es folgen weitere Strukturierungselemente, die für die einzelnen Fachbereiche notwendig sind. Dadurch soll jeder Anwender in der Lage sein, die benötigten Informationen immer an der ihm bekannten Stelle zu finden. Für den Konstrukteur soll dagegen klar ersichtlich sein, innerhalb welcher der vordefinierten Gruppen er die entsprechende Geometrie abzulegen hat.

Die weiteren Strukturierungselemente werden nachfolgend ausführlicher beschrieben. Generell wird für jedes Strukturierungselement eine einmalige ID vergeben. Damit lassen sich Strukturelemente durch Schnittstellen explizit auffinden und ansprechen. Zum besseren Verständnis wird an dieser Stelle auf die Abbildungen 6.16 bis 6.18 verwiesen. Darin ist der Strukturbaum des Startmodells zu erkennen.

Die Strukturebene der Eingabe gliedert sich wiederum in die beiden Bereiche (Feature Groups) *\_Externe\_Referenzen* sowie *\_Referenzen*.

Als *\_Externe\_Referenzen* gelten Geometrieelemente, die aus anderen Bauteilen „tot“ oder „assoziativ“ in das aktive Bauteil kopiert werden [Bril]. Die Feature Group enthält folgenden Untergruppen. Die *\_Strak\_Geometrie* enthält die Design Geometrie der ersten Abtastungen der Tonmodelle aus dem Design. Die Feature Group *\_Adapter\_Geometrie* enthält die Anschlussgeometrien. Für Elemente der Kinematik existiert die Feature Group *\_Kinematik\_Elemente*; für Referenzen aus bzw. für Zeichnungen die Feature Group *\_2D\_Geometrie*. Zusätzlich ist noch die Feature Group *\_Geänderte\_externe\_Referenzen* enthalten. Sie bietet Referenzelemente, die in ihrer Größe beschnitten wurden (*\_Geänderte\_externe\_Referenzen* enthält zudem die weitere Feature Group *\_Begrenzungsbox*, in der die Features zum Erzeugen des Beschnitts abzulegen sind).

Das Strukturierungselement *\_Referenzen* enthält dagegen die Untergruppen *\_Basis\_Koordinatensystem*, *\_Richtungen* (zur Definition der Materialrichtung), *\_Konzept\_Geometrie*, *\_Teilungselemente* (beispielsweise für Teilungsebenen der Werkzeuge) sowie *\_Rohrachsen*.

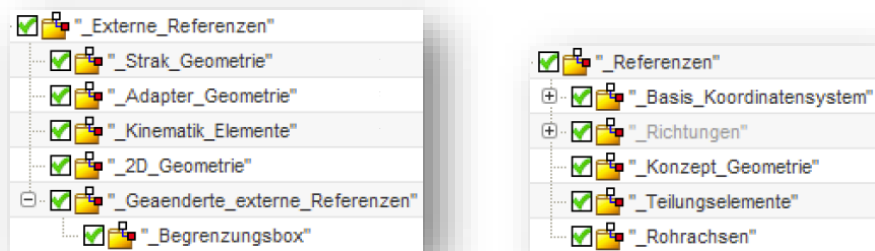


Abbildung 6.16 Untergruppen der Feature Groups *\_Externe\_Referenzen* sowie *\_Referenzen* aus der Strukturebene Eingabe

Innerhalb der Strukturebene Verarbeitung (*\_Bauteil\_Konstruktion*) erfolgt die eigentliche Konstruktion des Bauteils. Dazu stehen weitere Feature Groups bereit. Die Feature Group *\_Basiskörper* ist hier speziell für die Konstruktionsmethode CAPE\_NT angelegt. Bei dieser Konstruktionsmethodik werden zunächst die Außen- sowie die Innengeometrie (zumeist eine Kavität) konstruiert. Zusätzlich wird noch die Fräs- und Bohrbearbeitung festgeschrieben, welche den vorhandenen Maschinenpark berücksichtigt.

Soll ein Bauteil entlang der Fertigungszustände modelliert werden, steht dazu die Feature Group *\_Rohteil* bereit. Darin enthalten sind je nach Fertigungsart weitere Untergruppen wie z. B. das *\_Basisbauteil*, die *\_Standardverprägungen*, die *\_Flansche*, die *\_Ausparungen* sowie



die *\_Spezielle\_Geometrie* enthalten. Teilweise sind innerhalb dieser Feature Groups noch weitere Untergruppen vorhanden.

Außerdem ist in der Strukturebene der *\_Bauteil\_Konstruktion* die Feature Group *\_Bearbeitung* enthalten, in welcher sich entsprechende Bearbeitungsschritte ablegen lassen.

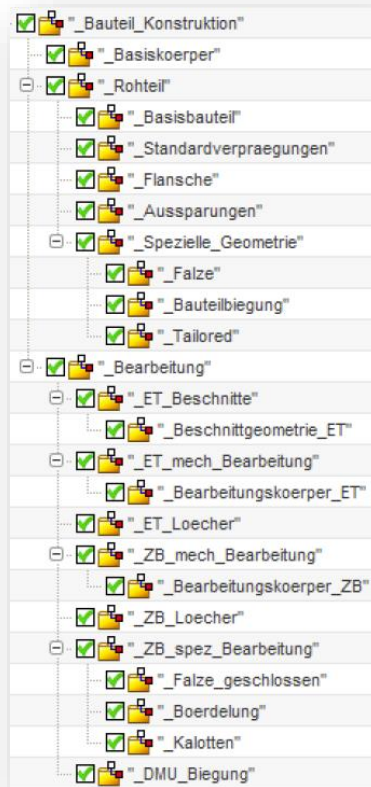


Abbildung 6.17 Untergruppen der Feature Groups *\_Rohteil*, *\_Bearbeitung* aus der Strukturebene *\_Bauteil\_Konstruktion*

Innerhalb der Strukturebene *\_Ergebnisse\_Informationen* (siehe Abbildung 6.18) sind sämtliche Informationen abgelegt, welche für Folgeprozesse benötigt werden. Im Hinblick auf die automatisierte Erstellung von Toleranzsimulationsmodellen liegen also in den Untergruppen dieser Feature Group die relevanten Informationen. Eine wichtige Untergruppe bildet hier die Feature Group *\_PMI\_Zusatzgeometrie*, in der die gesamten Toleranzinformationen hinterlegt werden (näheres dazu in Kapitel 6.4.3). Außerdem ist in diesem Zusammenhang die Feature Group *\_Verbindungselemente* zu erwähnen, in welcher sämtliche Fügeelemente wie Schweißpunkte etc. zu hinterlegen sind.



Abbildung 6.18 Untergruppen der Strukturebene *\_Ergebnisse\_Informationen*

Nachfolgend werden die Informationen zu einer Fügestelle genauer spezifiziert.

### 6.4.2 Fügetechnik in Siemens NX

Durch eine Fügestelle werden mindestens zwei Bauteile in einer Montagestation miteinander verbunden. Im Karosserierohbau sind Fügeelemente vorzugsweise Schweißpunkte, weshalb diese nachfolgend als relevante Fügstellen zu betrachten sind.

Grundsätzlich erfolgt die Ablage der Fügstellen innerhalb der Baugruppen als separates Bauteil (Kürzel VE-ZBNameXY).







Sections	
<input checked="" type="checkbox"/>  A2476300100	ZB SEITENWAND VST AU LI
<input checked="" type="checkbox"/>  A2476304900	ZB HALTER VO OB LI
<input checked="" type="checkbox"/>  A0089893971	EINKOMPONENTENKLEBER / ...
<input checked="" type="checkbox"/>  A2476300100_1	VE-ZB SEITENWAND VST AU LI
<input checked="" type="checkbox"/>  A2476300700	ZB BEPLANKUNG SEITENWAN...
<input checked="" type="checkbox"/>  A2476300300	ZB SEITENWAND AU LI

Abbildung 6.19 Baugruppe enthält das Bauteil Verbindungselemente (VE-ZB Seitenwand VST AU LI)

Die Ablage der Verbindungselemente erfolgt in der entsprechenden Feature Group *\_Schweißpunkte*, welche eine Untergruppe der Feature Group *\_Verbindungselemente* darstellt.

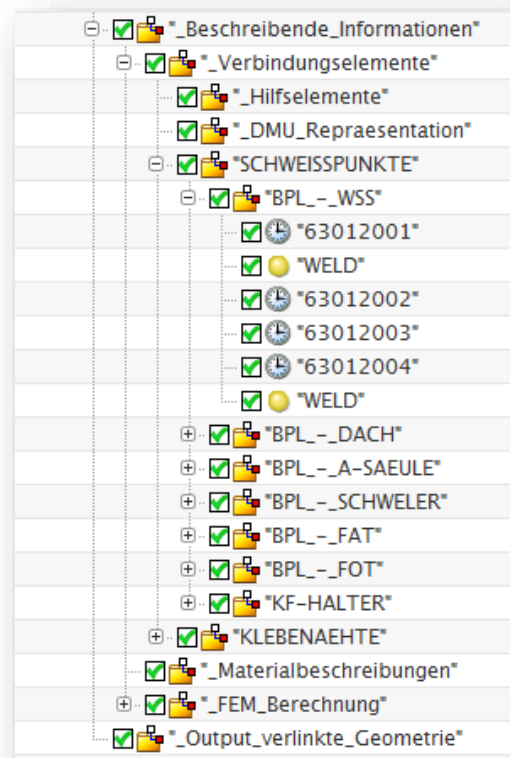


Abbildung 6.20 Abgelegte Schweißpunkte in der zugehörigen Feature Group

Neben dem Schweißpunkt (z. B. 63012001) enthält diese Feature Group zusätzlich noch die Schweißoperation (WELD). Darin ist festgelegt, welche Schweißpunkte der Schweißroboter in einer Operation ausführt. Beim Erstellen des Features Schweißpunkt werden folgende, für die Toleranzsimulation wichtigen Parameter abgelegt und als Attribute gespeichert:

- Verbindungspartner (Joined Partner) vom Typ String

- Schweißpunkt ID (ID) vom Typ String
- Schweißrichtung (z. B. Weld\_k\_value) vom Typ String
- Koordinaten des Schweißpunkts (Z-Pos, Y\_Pos, X\_Pos) vom Typ Number

### 6.4.3 Bezüge und Toleranzen in Siemens NX

Zur Archivierung der Toleranzinformationen steht innerhalb des Startmodells die Feature Group *\_PMI\_Zusatzinformationen* bereit. Ein Überblick der einzelnen Features innerhalb der Feature Group *\_PMI\_Zusatzinformationen* bietet Abbildung 6.21:

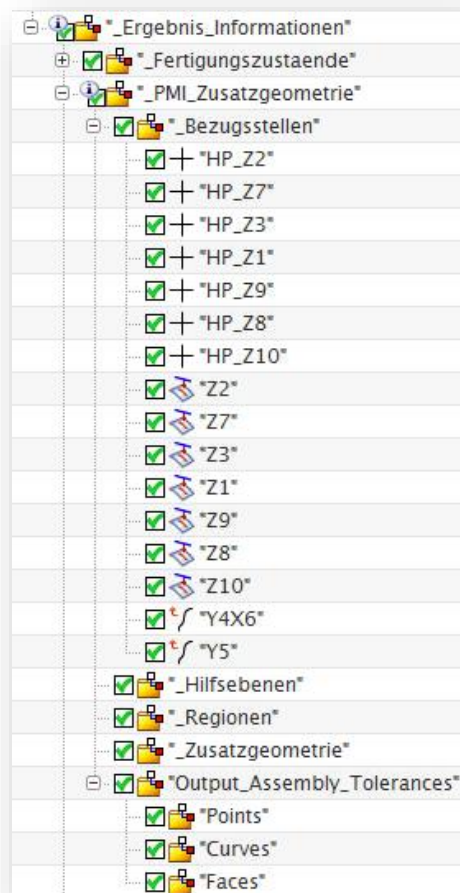


Abbildung 6.21 Feature Groups innerhalb der Strukturebene *\_PMI\_Zusatzgeometrie*

#### 6.4.3.1 Bezugsstellen in Siemens NX

Eine Bezugsstelle ist folgendermaßen aufgebaut. Es wird ein Hilfspunkt definiert (z. B. HP Z2), der die generelle Position sowie die Wirkrichtung der Bezugsstelle festlegt. Dieser Hilfspunkt wird anschließend durch eine Projektion (entlang der Wirkrichtung des Bezugs) auf die

Geometrie des Bauteils projiziert. Der Hilfspunkt bildet auch die Basis für das spätere PMI (Process-Manufacturing-Information), welches den Bezug im Graphikfenster visualisiert.

Für Bezüge, die an Bohrungen etc. erstellt werden, ist dagegen die entsprechende Randkurve in der Feature Group der Bezugsstellen abzuspeichern (Composite Curve siehe z. B. Y5). Die Benennung der Bezugsstellen erfolgt nach der Daimler internen Norm MBN 1101. Die exakten Koordinaten des projizierten Hilfspunkts, und damit die Koordinaten der Bezugsstelle, finden sich wiederum als Attribute in der entsprechenden Kinderklasse der Projektion. Die Wirkrichtung des Bezugs ist dagegen in den Eigenschaften der Projektion enthalten. Koordinaten von Bezügen an Bohrungen lassen sich ebenfalls in der entsprechenden Kindklasse der erstellten Randkurve finden.

### 6.4.3.2 Toleranzen und tolerierte Elemente in Siemens NX

Toleranzen und tolerierte Elemente werden in Siemens NX ausschließlich in der Untergruppe einer Model View abgelegt (*\_Part\_Tolerances*). Dies ermöglicht die Unterscheidung zwischen Toleranzen, die nur für ein Einzelteil gelten und jenen, die für den Zusammenbau relevant sind. Somit lassen sich entsprechende Flächen an Bauteilen mit mehreren Toleranzinformationen belegen.

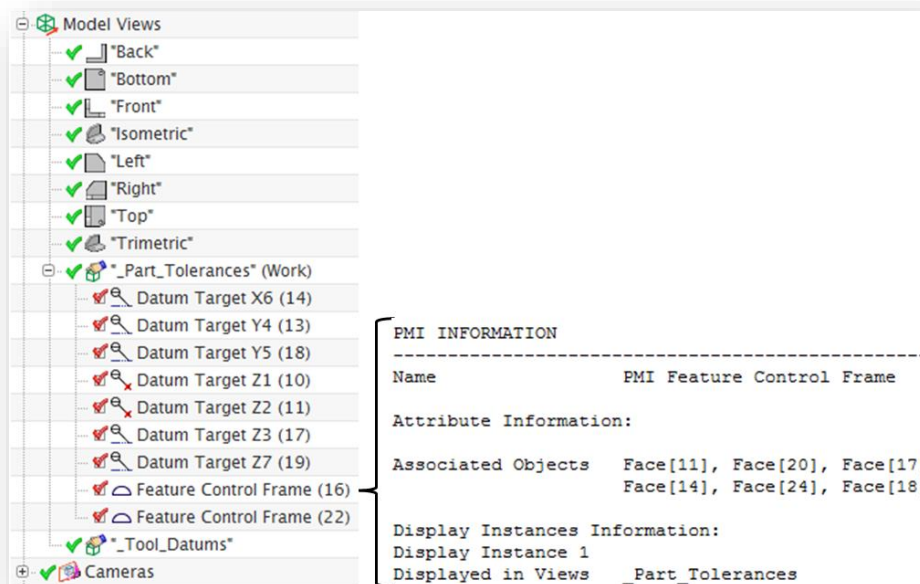


Abbildung 6.22 PMI Informationen in der Model View *\_Part\_Tolerances*

In den Attributen eines tolerierten Elements sind die Flächen enthalten, welche die Toleranz erhalten (z. B. Face 18 - Abbildung 6.22). Die Nummerierung der Flächen geschieht nach dem Prinzip des Begrenzungsflächenmodells (B-Rep).

#### 6.4.4 Spann- und Fixierkonzept in Siemens NX

Die Ablage des Spann- und Fixierkonzepts (SFK) erfolgt als eigenständiges Bauteil innerhalb der Baugruppe. Jeder Montageschritt, der in der Anlage separat durchgeführt wird, hat damit ein eigenes Spann- und Fixierkonzept. Die Features, die zur Darstellung des SKFs benötigt werden, liegen unter der Strukturebene *\_Ergebnisse\_Informationen* (*\_Results\_Information*) in der Untergruppe *\_Beschreibende\_Informationen* (*\_Describing\_Information*). Darin enthalten ist die Feature Group *SFK*.

Zur Darstellung im Produkt erfahren die verschiedenen Spanntypen<sup>15</sup> eine vereinfachte Darstellung. Spanntypen AL, AS repräsentieren eine Kugel, Spanntypen FS, FZ einen Zylinder. Zudem werden Spannelemente unter Siemens NX durch zwei spezielle Features repräsentiert. Es ist zwischen dem *Datum Surface Locator* (Kugel) und *Datum Pin Locator* (Zylinder) zu unterscheiden. Bei der Erstellung des SKFs werden den einzelnen Spanntypen dann unter anderem die folgenden Attribute zugewiesen:

- Spanntyp (SFK Clamping Type) vom Typ String
- Bezugsstellenbezeichnung (SFK Datum Target) vom Typ String
- Spannrichtung (Control\_Direction) vom Typ String
- ID vom Typ String
- Flächennormale (Plane\_Normal) vom Typ Number
- Koordinaten des Spannpunkts (Z\_Pos, Y\_Pos, X\_Pos) vom Typ Nummer

#### 6.4.5 Messplanung in Siemens NX

Auch die Informationen, die durch die Messplanung erzeugt werden, finden sich in einem separaten Bauteil des CAD-Modells innerhalb einer eigenen Feature Group.

---

<sup>15</sup> Im Karosserierohbau wird prinzipiell zwischen zwei Spanntypen unterschieden: einerseits flächige Bauteilauflagen, die das zu fixierende Bauteil entweder nur unterstützen (AL) oder die das Bauteil klemmen (AS); andererseits Fixierstifte, die in feststehende (FS) oder in ziehbare (FZ) unterteilt sind.

Zur Messung von Fugen und Versatz werden an sämtlichen Stellen aus der im Fugen- und Radienplan vermerkten Positionen Schnitte erzeugt. Der Normalenvektor der Schnittebene steht dabei stets orthogonal zum Normalenvektor der Randkurve (Bauteilberandung) an der betrachteten Schnittposition. Die Schnittebene findet sich in der Feature Group *\_Schnitte* der Messplanung in den jeweils geschnittenen Bauteilen. Basierend auf dem erzeugten Schnitt werden Messpunkte in der Schnittebene erzeugt. Die Ablage der Messpunkte erfolgt in der Feature Group *\_Messpunkte* des jeweiligen Bauteils, auf dem der Messpunkt liegt. Die Benennung dieser Messpunkte richtet sich nach dem in Kapitel 6.3 erwähnten Prinzip. Auch Funktionsmaße werden hier abgelegt.

## 6.5 Datenbank und Schnittstellenformat zur automatisierten Erstellung von Toleranzsimulationsmodellen

Die im vorhergehenden Kapitel dargelegten erforderlichen Daten zum Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen müssen, wie in Kapitel 0 erläutert, in ein softwareunabhängiges Austauschformat überführt werden. Die Architektur dieses Formats ist abhängig von den beiden Programmen, zwischen denen der Informationsaustausch realisiert werden soll. Grundsätzlich gilt es, die in Abbildung 4.15 und 4.17 dargestellten Klassengerüste zu verbinden. Zudem muss die Möglichkeit zur Erweiterung zwecks der späteren Anbindung eines Optimierungsprogramms gegeben sein.

Als Grundgerüst dient eine XML-Datenbank, deren Aufbau nachfolgend erläutert wird. Abbildung 6.23 zeigt die generelle Struktur der XML-Datenbank.

```
<?xml version="1.0" standalone="yes"?>
<XML_DB>
  <DB_Name>This_is_a_test_DB</DB_Name>
  <Working_Dir>C:/This_is_a_test_working_directory</Working_Dir>
  <Assembly_Graph>
  <Point_Info>
  <Tolerances>
  <Moves>
  <Parts>
  <Geo_Parts>
  <Measurements>
  <TolSim>
  <Var_Analysis>
</XML_DB>
```

Abbildung 6.23 Generelle Struktur der XML-Datenbank

Innerhalb der ersten beiden Tags der XML-Datenbank stehen der Name der Datenbank (Projektname) sowie das Arbeitsverzeichnis des Projekts. Gefolgt werden diese beiden Tags durch den Fügegraphen der zu simulierenden Baugruppe. Innerhalb dieses Fügegraphen finden sich Informationen zur Zusammenbau- und zur Einlegreihenfolge. Auch die Stationsbezeichnung der entsprechenden Zusammenbauoperation muss hier abgelegt werden. Abbildung 6.24 zeigt einen Fügegraphen als Auszug aus der XML-Datenbank.

```
<Assembly_Graph>
  <Assembly>
    <Part_Number>A2318810900</Part_Number>
    <Station>Station_090</Station>
    <Pos_Order>1</Pos_Order>
    <Assembly>
      <Part_Number></Part_Number>
      <Station>Station_070</Station>
      <Pos_Order>1</Pos_Order>
      <Assembly>
        <Part_Number>A2318810400</Part_Number>
        <Station></Station>
        <Pos_Order>2</Pos_Order>
      </Assembly>
      <Assembly>
        <Part_Number>A2318810500</Part_Number>
        <Station></Station>
        <Pos_Order>1</Pos_Order>
      </Assembly>
    </Assembly>
  </Assembly>
  <Assembly>
    <Part_Number>A2318810200</Part_Number>
    <Station></Station>
    <Pos_Order>2</Pos_Order>
  </Assembly>
  <Assembly>
    <Part_Number>A2318810300</Part_Number>
    <Station></Station>
    <Pos_Order>3</Pos_Order>
  </Assembly>
</Assembly>
</Assembly_Graph>
```

Abbildung 6.24 Der Fügegraph innerhalb der XML-Datenbank

Die „Point\_Info“ beinhaltet alle wichtigen Punktinformationen des Projekts. Darin enthalten sind Bezugsstellen FTAs (Functional Tolerancing and Annotation), SFKs (Spann- und Fixierkonzeptpunkte), VEs (Verbindungselemente), MPs (Messpunkte) sowie Uds (User Defined). Innerhalb der XML-Datenbank sind diese Punkte exakt einmal definiert und jedem dieser Punkte ist eine eindeutige ID zugeordnet. Alle späteren Verweise auf einen dieser Punkte geschieht dann mit der Punkt-ID. Abbildung 6.25 zeigt einen Auszug dieser Punktinformationen.



```
<Point_Info>
  <FTAs>
    <FTA>
      <FTA_ID>FTA_Pt1</FTA_ID>
      <Coordinates>
        <X>0.157</X>
        <Y>-13.5673</Y>
        <Z>29.033</Z>
      </Coordinates>
      <Direction>
        <I>-0.6356</I>
        <J>63.53</J>
        <K>0.033</K>
      </Direction>
    </FTA>
  </FTAs>
  <SFKs>
  </SFKs>
  <VEs>
  </VEs>
  <MPs>
  </MPs>
  <UDs>
</Point_Info>
```

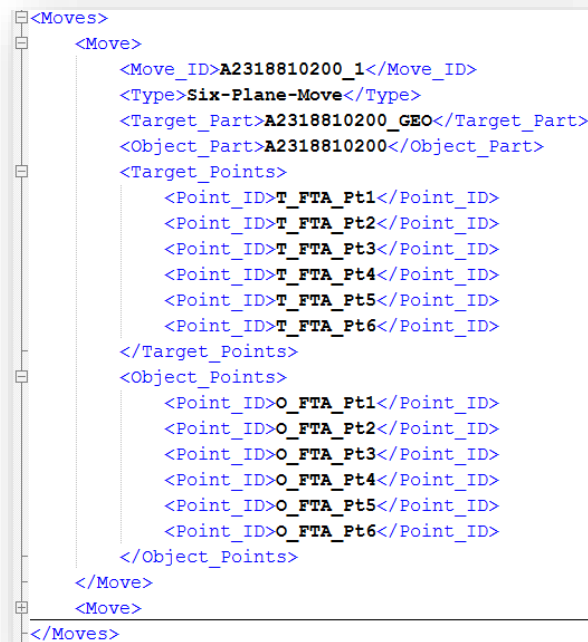
Abbildung 6.25 Punktinformationen innerhalb der XML-Datenbank

Abbildung 6.26 stellt dar, wie die Toleranzinformationen innerhalb der XML-Datenbank abgelegt werden. Die Abbildung zeigt eine Liste von Attributen, die pro Toleranz zu hinterlegen sind. Ausgegangen wird dabei von einer punktbasierten Toleranzsimulationsmodellerstellung (vgl. Kapitel 2.3.6). Auch hier besitzt jede Toleranz wieder eine eindeutige ID. Alle Punkte, denen später eine Toleranz zugeordnet werden soll, finden sich innerhalb der Sektion „Assigned\_Points“. Es erfolgt der Verweis auf die entsprechenden Punkte-IDs der „Point\_Info“.

```
<Tolerances>
  <Tolerance>
    <Tolerance_ID>Standard_Linear_Tol</Tolerance_ID>
    <Type>Linear</Type>
    <Distribution_Type>Normal</Distribution_Type>
    <Range>5</Range>
    <Offset>0</Offset>
    <USL>+3</USL>
    <LSL>-2</LSL>
    <Assigned_Points>
      <Point_ID>SFK_Pt1</Point_ID>
      <Point_ID>FTA_Pt2</Point_ID>
    </Assigned_Points>
  </Tolerance>
</Tolerances>
```

Abbildung 6.26 Toleranzinformationen innerhalb der XML-Datenbank

Die Zusammenbauoperationen, die später im Toleranzanalyseprogramm erstellt werden müssen, finden sich innerhalb der XML-Datenbank im „Move“-Bereich. Hier erfolgt eine paarweise Verknüpfung der Objekte und Zielpunkte. Dies spiegelt den Fügeprozess in der Produktionsanlage wider. Abbildung 6.27 zeigt ein Beispiel dieser Sektion innerhalb der XML-Datenbank.



```
<Moves>
  <Move>
    <Move_ID>A2318810200_1</Move_ID>
    <Type>Six-Plane-Move</Type>
    <Target_Part>A2318810200_GEO</Target_Part>
    <Object_Part>A2318810200</Object_Part>
    <Target_Points>
      <Point_ID>T_FTA_Pt1</Point_ID>
      <Point_ID>T_FTA_Pt2</Point_ID>
      <Point_ID>T_FTA_Pt3</Point_ID>
      <Point_ID>T_FTA_Pt4</Point_ID>
      <Point_ID>T_FTA_Pt5</Point_ID>
      <Point_ID>T_FTA_Pt6</Point_ID>
    </Target_Points>
    <Object_Points>
      <Point_ID>O_FTA_Pt1</Point_ID>
      <Point_ID>O_FTA_Pt2</Point_ID>
      <Point_ID>O_FTA_Pt3</Point_ID>
      <Point_ID>O_FTA_Pt4</Point_ID>
      <Point_ID>O_FTA_Pt5</Point_ID>
      <Point_ID>O_FTA_Pt6</Point_ID>
    </Object_Points>
  </Move>
</Moves>
```

Abbildung 6.27 Zusammenbauoperationen in der XML-Datenbank

Die Bauteileinformationen des Fügegraphen werden innerhalb der „Parts“ abgelegt. Bemerkenswert ist, dass sich innerhalb jedes Bauteils eine Punktwolke „Point Set“ findet. Diese Punktwolken bilden ein Gitter an Punkten auf der Bauteiloberfläche. Für jeden dieser Gitterpunkt werden die Punktkoordinaten sowie der zugehörige Richtungsvektor abgelegt. Diese Punktwolken bilden die Basis der in Kapitel 7 erläuterten Kopplung eines Optimierers. Neben den Punktwolken können innerhalb der „Parts“ FTAs, SKFs, VEs, MPs sowie Uds verknüpft sein (siehe Abbildung 6.28).

Zusätzlich zu den Bauteilen des Fügegraphen werden beim Aufbau der punktbasierten 3D-Toleranzsimulationsmodelle auch sog. Geostationen benötigt. Diese Stationen dienen der Positionierung der Bauteile während des Verbauprozesses. Der grundlegende Unterschied zwischen Bauteilen und Geostation ist der, dass die Geostation nach der Verbauposition keinen Bestandteil der Baugruppe bildet. Deshalb können Geostationen auch kein „Point Set“,

keine Verbindungstechnik (VEs) und keine Messpunkte (MPs) besitzen. Abbildung 6.28 zeigt den Aufbau der Geostationen in der XML-Datenbank.

```

<Parts>
  <Part>
    <Part_ID>A2318810200</Part_ID>
    <Point_Set>
      <Point>
        <Point_ID>A2318810200_Pt1</Point_ID>
        <Coordinates>
          <X>0.157</X>
          <Y>-13.5673</Y>
          <Z>29.033</Z>
        </Coordinates>
        <Direction>
          <I>-0.6356</I>
          <J>63.53</J>
          <K>0.033</K>
        </Direction>
      </Point>
      <Point>
      </Point>
    </Point_Set>
    <FTAs>
      <FTA_ID>FTA_Pt1</FTA_ID>
      <FTA_ID>FTA_Pt2</FTA_ID>
      <FTA_ID>FTA_Pt5</FTA_ID>
    </FTAs>
    <SFKs>
    </SFKs>
    <VEs>
    </VEs>
    <MPs>
    </MPs>
  </Part>
  <Part>
  </Part>
  <Part>
  </Part>
</Parts>

<Geo_Parts>
  <Geo_Part>
    <Geo_Part_ID>A2318810200_GEO</Geo_Part_ID>
    <FTAs>
      <FTA_ID>FTA_Pt1</FTA_ID>
      <FTA_ID>FTA_Pt4</FTA_ID>
    </FTAs>
    <SFKs>
      <SFK_ID>SFK_Pt2</SFK_ID>
      <SFK_ID>SFK_Pt4</SFK_ID>
    </SFKs>
  </Geo_Part>
  <Geo_Part>
  </Geo_Part>
</Geo_Parts>

```

Abbildung 6.28 Parts und Geostationen in der XML-Datenbank

Beim Abspeichern von Messinformationen unterscheidet die XML-Datenbank zwei Typen: Punkt-zu-Punkt Messungen und Nominalmessungen. Abhängig vom Messtyp werden entweder ein Objekt und ein Zielpunkt (z. B. bei Fugen und Versatzmessungen) oder nur ein Objektpunkt (z. B. bei Funktionsmaßen) benötigt. Zudem stehen Attribute wie eine obere- und untere Spezifikationsgrenze zur Verfügung. Abbildung 6.29 zeigt Messungen in der XML-Datenbank.

```

<Measurements>
  <Measurement>
    <Measurement_ID>Measure1</Measurement_ID>
    <Type>PointToPoint</Type>
    <Object_Part>A2318810400</Object_part>
    <Object_Point>A2318810400_MP1</Object_Point>
    <Target_Part>A2318810300</Target_Part>
    <Target_Point>A2318810300_MP1</Target_Point>
    <USL>+2</USL>
    <LSL>-2</LSL>
  </Measurement>
  <Measurement>
  </Measurement>
</Measurements>

```

Abbildung 6.29 Messungen in der XML-Datenbank

In der Sektion „Toleranzsimulation“ liegen alle notwendigen Einstellungen zur Durchführung der Simulation bereit („siehe auch TolSim\_Settings“). Es findet sich zudem ein Bereich zum Abspeichern der Simulationsergebnisse („TolSim\_Results“). Innerhalb dieses Bereichs können die Messergebnisse pro Messung hinterlegt werden. Diese werden ebenfalls für die in Kapitel 7 dargestellte Kopplung eines Optimierungsprogrammsystems benötigt. Abbildung 6.30 zeigt die Sektion „Toleranzsimulation“.

```
<TolSim>
  <TolSim_Settings>
    <Simulation_num>10000</Simulation_num>
    <Geo_Factor>on</Geo_Factor>
  </TolSim_Settings>
  <TolSim_Results>
    <Measurement>
      <Measurement_ID>Measuremet1</Measurement_ID>
      <Nominal>0.0</Nominal>
      <Mean>0.003600713203853</Mean>
      <Std>0.168065967047636</Std>
      <Std_Rng>1.008395802285816</Std_Rng>
      <LSL>-1.0</LSL>
      <USL>1.0</USL>
      <L-OUT>0.0</L-OUT>
      <H-OUT>0.0</H-OUT>
      <Tot-OUT>0.0</Tot-OUT>
      <Est.Type>Normal</Est.Type>
      <Est.Low>-0.500597187939055</Est.Low>
      <Est.High>0.507798614346761</Est.High>
      <Est.Range>1.008395802285816</Est.Range>
    </Measurement>
    <Measurement>
  </TolSim_Results>
</TolSim>
```

Abbildung 6.30 Toleranzsimulation in der XML-Datenbank

Damit steht ein Austauschformat bereit, mit dessen Hilfe die Überführung der 3D-CAD Informationen aus dem 3D-Master Prozess in ein Toleranzanalyseprogramm stattfinden kann. Dabei sind allerdings noch die in Abbildung 4.12 erläuterten Schritte notwendig. Die Umsetzung dieser Schritte im Rahmen einer Software wird nachfolgend dargestellt.

## 6.6 Software zur automatisierten Erstellung von Toleranzsimulationsmodellen

### 6.6.1 Datengrundlage

Zunächst erfolgt die initiale Erstellung der XML-Datenbank. Dazu muss der zu simulierende Umfang aus dem PDM-System (hier Smaragd) in das 3D-CAD System (hier Siemens NX) geladen werden. Die in Kapitel 0 dargestellte 3D-Master Methode ermöglicht anschließend

das gezielte Auslesen der Informationen. Dazu bietet das 3D-CAD System Siemens NX die Programmierschnittstelle NX Open. Mithilfe dieser API (Application Programming Interface) können über einen standardisierten Kommunikationsschlüssel (verfügbar für verschiedene Programmiersprachen) die im CAD-Modell gespeicherten Informationen sowie auch CAD eigene Features angesprochen werden. Abbildung 6.31 zeigt den ersten Schritt zur Generierung der XML-Datenbank.

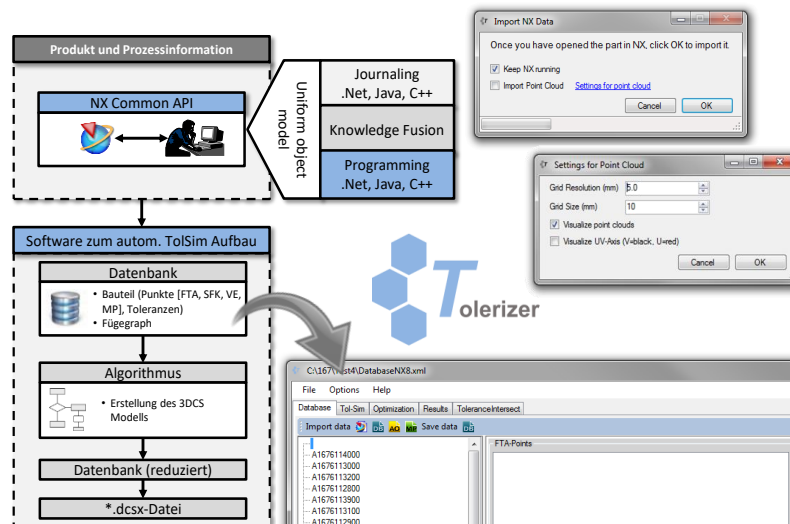


Abbildung 6.31 Erstellung einer XML-Datenbank mithilfe der NX Open API

## 6.6.2 Einbindung der digitalen Fügefolge als AML

Nachdem der Datenabzug aus dem 3D-CAD-System erfolgt ist, muss im nächsten Schritt der entsprechende Fügegraph erzeugt werden. Dazu kann aus dem PDM-System eine Fügefolge der zu simulierenden Fahrzeugkonfiguration im AML-Format geladen werden. Diese AML lässt sich innerhalb der Software zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen einlesen (siehe Abbildung 6.32).

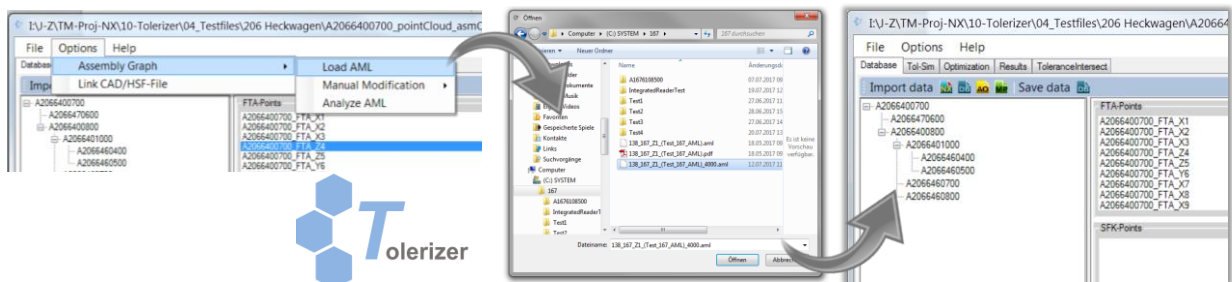


Abbildung 6.32 AML zur Darstellung des Fügegraphen in der XML-Datenbank

Beim Einlesen erfolgen das Parsen der AML-Datei sowie das Transformieren der ausgelesenen Elemente in ein Zwischenformat. Über die ID des Elements besteht weiterhin eine logische Verknüpfung zwischen dem Zwischenformat und dem ursprünglichen Element. Anschließend werden die ausgelesenen Informationen sortiert und in entsprechenden <parentchild>-Instanzen abgebildet (vgl. hierzu auch Abbildung 6.7 <parentchild> Klasse). Die Darstellung der Fügefolge der XML-Datenbank kann im Anschluss erfolgen. Dabei wird auf die <parentchild>-Instanzen und auf die Einlegreihenfolge unter Ableitung eines ID-basierten Beziehungsbaums (<parentchild>-ID) zurückgegriffen. Ist die Fügefolgestruktur komplett aus dem AML ausgelesen, so kann die Zuordnung der gültigen Sachnummern zu den Bauteil-IDs erfolgen. Abbildung 6.33 zeigt das Zwischenformat in C# nach der Aufspaltung der AML Rolle.

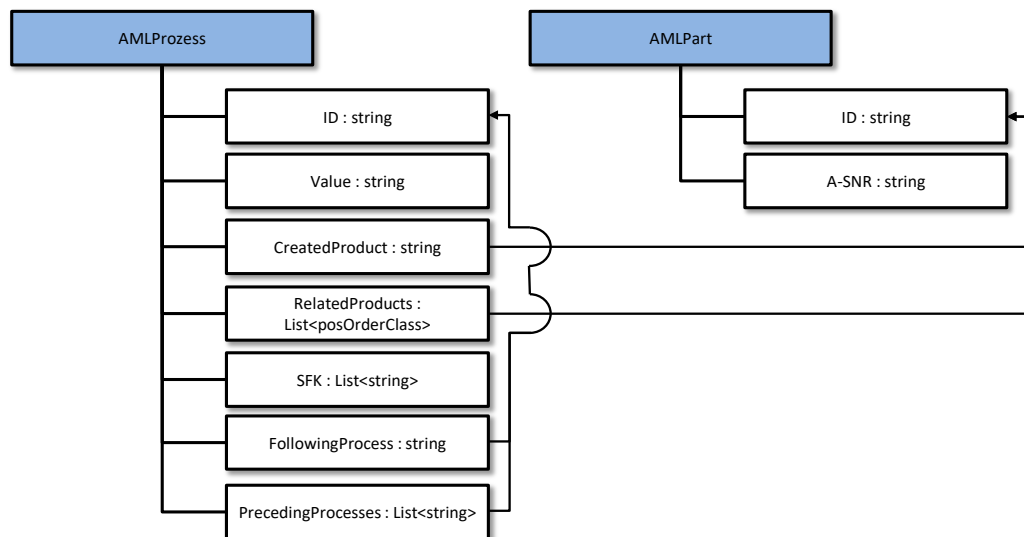


Abbildung 6.33 Zwischenformat der Fügefolge in C# nach Aufspaltung der AML Rolle

### 6.6.3 Einbindung des digitalen Fugenplans sowie des Funktionsmaßkatalogs zur Erstellung von Messungen an Qualitätsmerkmalen

Sollen bei der Toleranzsimulation Qualitätsmerkmalsmessungen aus Fugen- und Versatzmaßen oder Funktionsmaßen gebildet werden, so muss das entsprechende Fugen- oder Funktionsmaßbauteil beim Laden des Simulationsumfangs aus dem PDM-System berücksichtigt werden. Wie in Kapitel 6.3 erwähnt, liegen im Funktions- oder Fugenmaßbauteil an den ausgewiesenen Qualitätsmerkmalen verlinkte CAD-Geometrien vor. Diese Links verweisen auf die eigentlichen Bauteilsachnummern des geladenen Umfangs. Die erforderlichen Informationen zur Definition der Messungen innerhalb der Toleranzanalyse-Software liefert hingegen das PMI beim jeweiligen Qualitätsmerkmal (z. B.

USL, LSL der Messung). In der Software zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen kann damit der Definition der Qualitätsmerkmale einfach das Fugen- oder Funktionsmaßbauteil ausgewählt werden. Anschließend kann das zu simulierende Qualitätsmerkmal aus einer Liste ausgewählt werden. Abbildung 6.34 zeigt die Auswahl von Fugen-, Versatz- oder Funktionsmaßen.

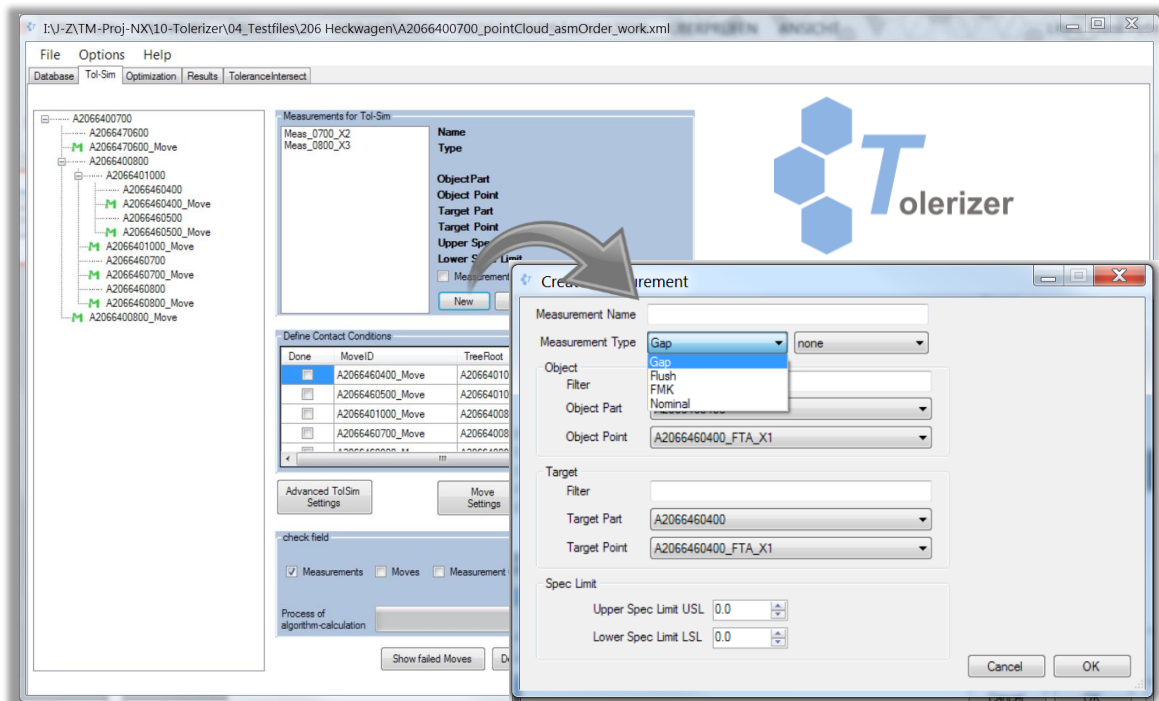


Abbildung 6.34 Definition von Qualitätsmerkmalen für die spätere 3D-Toleranzsimulation

### 6.6.4 Automatisierte Berechnung der Verbaupositionen

Nachdem die erforderlichen Informationen aus dem 3D-CAD System in die Software zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen gebracht, der Fügegraph aus dem PDM-System hinzugefügt und die zu messenden Qualitätsmerkmal definiert worden sind, müssen im nächsten Schritt die berechneten Zusammenbauoperationen mit den entsprechenden Punkten für die punktbasierte Simulationsmethode bestückt werden. Zur Auswahl stehen neben Bezugsstellen (FTA-Punkte) auch Spann- und Fixierpunkte (SFK) sowie Verbindungselemente (VE). Da pro Zusammenbauoperation nur jeweils sechs Objekte und sechs zugehörige Zielpunkte verwendet werden können, um die sechs Freiheitsgrade zu sperren (statisch bestimmter Simulationsaufbau), muss eine sinnvolle Selektion der Punkte erfolgen. Dazu wurde der nachfolgende Algorithmus entwickelt.

Pro möglicher Zusammensetzung der sechs Punkte der Zusammenbauoperation wird ein Koeffizient berechnet (siehe Formel 6.1). Je größer der Koeffizient ist, desto geeigneter sind die dabei ausgewählten Punkte der Zusammenbauoperation.

$$MK = DKx + SKy + PKz \quad (6.1)$$

Dieser Movekoeffizient setzt sich aus drei Termen zusammensetzt: dem Dreieckskoeffizient mit Gewichtungsfaktor  $DKx$  (primärer Term) dem Streckenkoeffizienten mit Gewichtungsfaktor  $SKy$  (sekundärer Term) sowie dem Punktkoeffizient mit Gewichtungsfaktor  $PKz$  (tertiärer Term). Ziel des Koeffizienten ist es, den systematischen Messfehler aller Messungen, die in der späteren Toleranzsimulation von Interesse sind, zu minimieren. Der Movekoeffizient kann den Wertebereich  $0 \leq MK \leq 3$  annehmen, wobei  $MK = 3$  für eine ideale Punkteverteilung der Zusammenbauoperation steht. Für die Gewichtungsfaktoren  $x, y, z$  gilt  $\sum GF = 1$ .

#### 6.6.4.1 Der Dreieckskoeffizient

Der Dreieckskoeffizient ist das Auswahlkriterium für das aufgespannte Dreieck in der primären Verbaurichtung. Die lineare Zusammensetzung lautet wie folgt (siehe Formel 6.2):

$$DK = A_D + B_D + C_D + D_D \quad (6.2)$$

mit  $A_D = a_D * A_{rel,proj}$ ,  $B_D = b_D * k_D$ ,  $C_D = c_D * VK_D$  und  $D_D = d_D * MPK_D$ .  $DK$  kann dabei den Wertebereich  $0 \leq DK \leq 1$  annehmen, wobei  $DK = 1$  für das ideale Dreieck steht. Für die Gewichtungsfaktoren  $a_D, b_D, c_D, d_D$  gilt wiederum  $\sum GF = 1$ .

#### Der Flächenkoeffizient $A_{rel,proj}$

Der projizierte Flächeninhalt des aufgespannten primären Dreiecks fasst die bisherigen Flächenverkippen und den wahren Flächeninhalt zusammen. Als wahrer Flächeninhalt gilt der Flächeninhalt in Wirkrichtung der primären Verbaurichtung (siehe auch Abbildung 6.35). Für alle Dreiecke wird zunächst der projizierte Flächeninhalt berechnet. Anschließend erfolgt die Normierung in Bezug auf den größten Flächeninhalt aller gebildeten Dreiecke (vgl. auch Formel 6.3):

$$A_{rel,proj} = \frac{A_{Dreieck,proj}}{A_{max,gl}} \quad (6.3)$$

Hierbei stehen  $A_{Dreieck,proj}$  für die projizierte Fläche des Dreiecks in primärer Richtung und  $A_{max,gl}$  für die maximale Fläche aller gebildeten Dreiecke.  $A_{rel,proj}$  kann den Wertebereich:



$0 \leq A_{rel,proj} \leq 1$  annehmen, wobei  $A_{rel,proj} = 1$  für das größte (und damit stabilste) Dreieck steht.

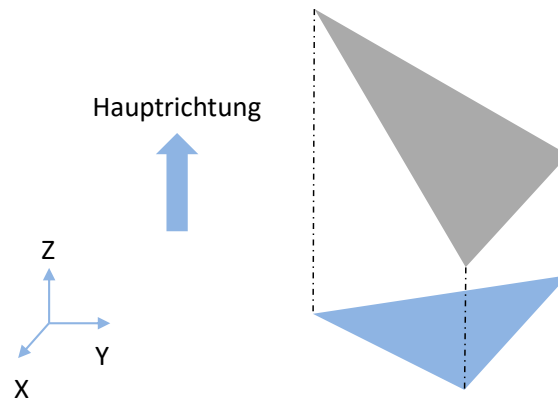


Abbildung 6.35 der Flächenkoeffizient  $A_{rel,proj}$

### Der Dreieckskorrekturfaktor $k_D$

Der Korrekturfaktor  $k_D$  bewertet die Art und Anzahl der verwendeten Verbaupunkte. Es erfolgt eine Unterscheidung zwischen Verbindungselementen (VE) und Bezugsstellen (FTA) sowie Spannstellen (SFK). Je nach Art der verwendeten Punkte im Dreieck wird der entsprechende Korrekturfaktor angewendet (siehe Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1 Der Dreieckskorrekturfaktor  $k_D$

	3 FTA	3 FTA + 1 VE	3 FTA + 2 VE	3 FTA + 3 VE
$k_D$	1 (Verwendung von 3 FTA)	0,5 (Verwendung von 3 FTA)	0,33 (Verwendung von 3 FTA)	0,25 (Verwendung von 3 FTA)
		1 (Verwendung von 2 FTA und 1 VE)	0,66 (Verwendung von 2 FTA und 1 VE)	0,5 (Verwendung von 2 FTA und 1 VE)
			1 (Verwendung von 1 FTA und 2 VE)	0,75 (Verwendung von 1 FTA und 2 VE)
				1 (Verwendung von 3 VE)

### Der Dreiecksverkipfungskoeffizient $VK_D$

Der Verkipfungskoeffizient berücksichtigt in Verbindung mit der idealen primären Verbauchse die einzelnen Punkte, die zum Verbau in der Primärriichtung in Frage kommen. Formel 6.4 zeigt die Berechnung des Verkipfungskoeffizienten. Eine graphische Darstellung findet sich in Abbildung 6.36.

$$VK_D = 1 - \frac{vk_{Dreieck} - vk_{min,gl}}{vk_{max,gl} - vk_{min,gl}} \quad (6.4)$$

Es gilt  $vk_{Dreieck} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}$ , wobei  $\alpha$  den Winkel zwischen der primären Ausrichtung und dem ersten Verbaupunkt darstellt.  $\beta$  ist der Winkel zwischen der primären Ausrichtung und dem zweiten Verbaupunkt und  $\gamma$  der Winkel von primärer Ausrichtung zum dritten Ausrichtpunkt. Der Verkippungskoeffizient kann einen Wertebereich von  $0 \leq VK_D \leq 1$  annehmen, wobei  $VK_D = 1$  das beste Dreieck in Bezug auf die Verkippung der einzelnen Punkte zur Primärachse darstellt.

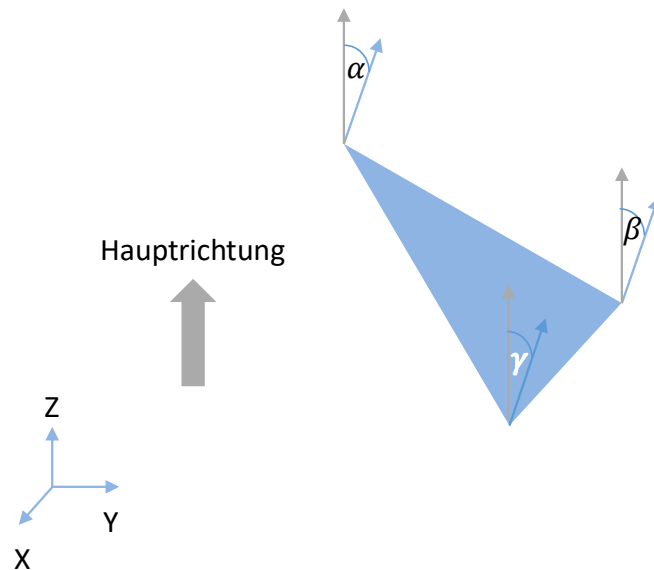


Abbildung 6.36 Der Dreiecksverkippungskoeffizient  $VK_D$

### Der Messpunktkoeffizient $MPK_D$

Der Messpunktkoeffizient dient der Bestimmung des Verhältnisses zwischen den gebildeten Dreiecken und den definierten Qualitätsmerkmalen (Messpunkten) der Toleranzsimulation. Auch der Messpunktkoeffizient weist einen linearen Zusammenhang nach Formel 6.5 auf:

$$MPK_D = 1 - \frac{d_{MPK,max,Dreieck} - d_{MPK,min,gl}}{d_{MPK,max,gl} - d_{MKP,min,gl}} \quad (6.5)$$

Den maximale Abstand zwischen einem Zusammenbauoperationspunkt und den Messpunkten für das aktuell gebildete Dreieck stellt dabei  $d_{MPK,max,Dreieck}$  dar. Der maximale Abstand zwischen einem Zusammenbauoperationspunkt und den Messpunkten aller möglichen Dreieckskombinationen wird durch  $d_{MPK,max,gl}$  ausgedrückt.  $d_{MKP,min,gl}$  stellt dagegen den minimalen Abstand zwischen einem Zusammenbauoperationspunkt und den Messpunkten aller Dreieckskombinationen dar. Zur Abstandsberechnung müssen in einem ersten Schritt die einzelnen Messungen (Messpunkte) den nächstgelegenen Zusammenbauoperationspunkt zugeordnet werden. Im primären Fall ergeben sich drei

Gruppen, wie in Abbildung 6.37 dargestellt. Anschließend kann die Abstandsberechnung des aktuellen Dreiecks erfolgen und der Messpunktkoeffizient gebildet werden. Der Messpunktkoeffizient kann den Wertebereich  $0 \leq MPK_D \leq 1$  annehmen, wobei der Wert  $MPK_D = 1$  für das ideale Dreieck steht.

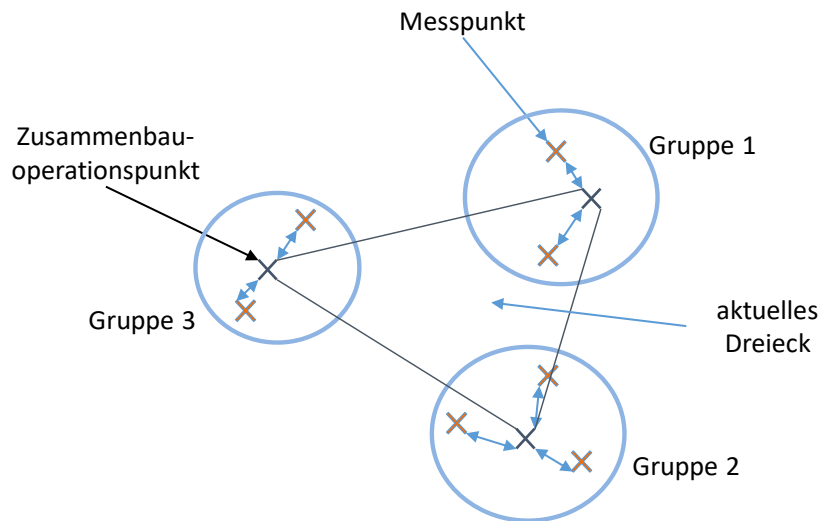


Abbildung 6.37 Abstandsberechnung und Gruppenbildung zur Ermittlung des  $MPK_D$

#### 6.6.4.2 Der Streckenkoeffizient

Analog zum Dreieckskoeffizienten für die primäre Ausrichtung des Zusammenbaus wird der Streckenkoeffizient entwickelt, um die sekundäre Ausrichtung des Zusammenbaus mit den richtigen Zusammenbaupunkten zu versorgen. Der Streckenkoeffizient besitzt die lineare Zusammensetzung nach Formel 6.6:

$$SK = A_S + B_S + C_S + D_S \quad (6.6)$$

Hierbei stellt  $A = a_S * L_{rel,proj}$  einen Längenkoeffizienten mit Gewichtungsfaktor dar.  $B = b_S * k_S$  steht für den Korrekturfaktor mit Gewichtungsfaktor. Der Verkippkoeffizient mit Gewichtungsfaktor wird durch  $C = c_S * VK_S$  ausgedrückt, der Messpunktkoeffizient nebst Gewichtungsfaktor wiederum durch  $D = d_S * MPK_S$ . Auch hier gilt  $0 \leq SK \leq 1$  mit  $SK = 1$  für die ideale Strecke. Die Gewichtungsfaktoren  $a_S, b_S, c_S, d_S$  können in Summe maximal den Wert 1 annehmen.

##### Der Längenkoeffizient $L_{rel,proj}$

Für alle Strecken (kürzeste Distanz zwischen zwei Zusammenbauoperationspunkten) der sekundären Ausrichtung wird zunächst die projizierte Streckenlänge berechnet und diese auf die größte Streckenlänge aller möglichen Kombinationen normiert. Es gilt Formel 6.7:

$$L_{rel,proj} = \frac{L_{Strecke,proj}}{L_{max,gl}} \quad (6.7)$$

Dabei stellt  $L_{Strecke,proj}$  die projizierte Streckenlänge der ausgewählten Zusammenbaupunkte dar.  $L_{max,gl}$  ist die maximale Strecke aller möglichen Punktepaare, die für die sekundäre Ausrichtung in Frage kommen. Für die längste Strecke gilt  $0 \leq L_{rel,proj} \leq 1$  mit  $L_{rel,proj} = 1$ .

### Der Streckenkorrekturfaktor $k_S$

Es werden alle verwendbaren Punktepaare der sekundären Richtung zusammengefasst, mithilfe der nachfolgenden Tabelle kategorisiert und mit dem Streckenkorrekturfaktor belegt (siehe Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2 Der Streckenkorrekturfaktor  $k_S$

	2 FTA	1 FTA + 1 VE	2 VE
$k_S$	1 (Verwendung von 2 FTA)	0,5 (Verwendung von 2 FTA)	0,33 (Verwendung von 2 FTA)
		1 (Verwendung von 1 FTA und 1 VE)	0,66 (Verwendung von 1 FTA und 1 VE)
			1 (Verwendung von 2 VE)

### Der Streckenverkippungskoeffizient $VK_S$

Analog zum Dreiecksverkippungskoeffizient berechnet sich der Streckenverkippungskoeffizient nach Formel 6.8:

$$VK_S = 1 - \frac{vk_{Strecke} - vk_{min,gl}}{vk_{max,gl} - vk_{min,gl}} \quad \text{mit} \quad vk_{Strecke} = \sqrt{\mu^2 + \omega^2} \quad (6.8)$$

$\mu$  stellt dabei den Winkel zwischen der sekundären Ausrichtung und dem ersten Verbaupunkt dar,  $\omega$  den zum zweiten Verbaupunkt.  $VK_S$  kann den Wertebereich  $0 \leq VK_S \leq 1$  annehmen, wobei für die geeignetste Strecke  $VK_S = 1$  gilt.

### Der Streckenmesspunktkoeffizient $MPK_S$

Für den Streckenmesspunktkoeffizient gilt die folgende Beziehung (siehe Gleichung 6.9):

$$MPK_S = 1 - \frac{d_{MPK,max,Strecke} - d_{MPK,min,gl}}{d_{MPK,max,gl} - d_{MPK,min,gl}} \quad (6.9)$$

$d_{MPK,max,Strecke}$  entspricht dabei dem maximalen Abstand zwischen einem Zusammenbauoperationspunkt und einem Messpunkt für die aktuell zu berechnende Punktepaarkombination. Auch hier erfolgt zuallererst wieder eine Berechnung der Abstände der Messpunkte zu den beiden Zusammenbauoperationspunkten und daraus folgend eine

Zuordnung in die zwei Gruppen. Für den  $MPK_S$  gilt folgender Wertebereich:  $0 \leq MPK_S \leq 1$  mit  $MPK_S = 1$  für die geeignetste Strecke.

### 6.6.4.3 Der Punktkoeffizient

Zur Auswahl des tertiären Zusammenbauoperationspunktes wird für alle geeigneten tertiären Punkte (FTA SIEHE OBEN, SFK, VE) ein Punktkoeffizient gebildet. Je höher der Punktkoeffizient, desto geeigneter ist der Punkt als tertiärer Zusammenbauoperationspunkt. Es gilt Formel 6.10:

$$PK = C_P + D_P \quad (6.10)$$

$C_P = c_P * VK_P$  ist dabei der Verkippungskoeffizient des Punktes (genauer: Verkippung des zugehörigen Richtungsvektors der Fläche, auf welcher der Punkt liegt) multipliziert mit dem Gewichtungsfaktor  $c_P$ .  $D_P = d_P * MPK_P$ : Dies ist wiederum der Messpunktkoeffizient des Punktes multipliziert mit dem Gewichtungsfaktor  $d_P$ . Für  $PK$  gilt  $0 \leq PK \leq 1$  mit  $PK = 1$  für den geeignetsten tertiären Zusammenbauoperationspunkt. Die Summe der Gewichtungsfaktoren muss auch hier den Wert 1 ergeben.

#### Der Punktverkippungskoeffizient $VK_P$

Auch beim tertiären Punkt stellt dieser Koeffizient die Verkippung der einzelnen geeigneten Zusammenbauoperationspunkte zur idealen tertiären Ausrichtachse dar. Es gilt Formel 6.11:

$$VK_P = \left(\frac{1}{10}\right)\sqrt{\varphi^2} \quad (6.11)$$

Wobei  $\varphi$  den Winkel zwischen der tertiären Achsenrichtung und dem Zusammenbauoperationspunkt entspricht. Für  $VK_P$  gilt  $0,1 \leq VK_P \leq 1$ ; wobei  $VK_P = 1$  der geeignetste Punkt ist.

#### Der Messpunktkoeffizient des tertiären Zusammenbauoperationspunktes

Zur Berechnung des tertiären Zusammenbauoperationspunktes fließen nur die Messpunkte ein, die beim primären und sekundären Messpunktkoeffizient nicht optimal durch die Ausrichtung des Dreiecks oder der Strecke abgedeckt worden sind. Es gilt Formel 6.12:

$$MPK_P = 1 - \frac{d_{MPK,max,Punkt} - d_{MPK,min,gl}}{d_{MPK,max,gl} - d_{MPK,min,gl}} \quad (6.12)$$

$d_{MPK,max,Punkt}$  entspricht dem maximalen Abstand zwischen dem Zusammenbauoperationspunkt und dem Messpunkt des aktuell ausgewählten tertiären

Punktes. Auch hier gilt für den Wertebereich  $0 \leq MPK_p \leq 1$  mit  $MPK_p = 1$  für den idealen Zusammenbauoperationspunkt.

Damit können für die Zusammenbauoperationen der Toleranzsimulation sowohl primäre, sekundäre als auch der tertiäre Verbaupunkte berechnet werden. Pro Verbauschritt der Simulation können diese dann in der XML-Datenbank abgelegt und der Simulationssoftware zur Verfügung gestellt werden.

Die Software zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen erlaubt dem Nutzer eine Reihe von Einstell- und Eingriffsmöglichkeiten.

### 6.6.5 Grundlegende Einstell- und Eingriffsmöglichkeiten der Software

Die Software zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen erlaubt während des automatisierten Aufbaus der Simulation sowohl globale Einstellungen und als auch lokale Eingriffe.

#### 6.6.5.1 Globale Einstellmöglichkeiten der Software

Zum automatisierten Aufbau und beim Durchlauf der 3D-Toleranzanalyse sind einige Einstellungen notwendig zum Ausführen der Simulation. Grundsätzlich muss ein Toleranzsimulationstool eingebunden sein, welches vom Kommandozeileninterpreter in einer Stapelverarbeitung ausgeführt werden kann (Batch-Call). In der entwickelten Software müssen dazu die entsprechenden Pfade zum Ausführen hinterlegt sein. Diese Einstellungen müssen global getroffen werden. Ferner wurde im vorigen Kapitel der Algorithmus zur automatisierten Berechnung der Zusammenbauoperationspunkte vorgestellt (im Weiteren als Smirnoff-Algorithmus bezeichnet). Darin können eine Vielzahl an Gewichtungsfaktoren (Dreiecksgewichtungsfaktoren:  $a_D, b_D, c_D, d_D$ ; Streckengewichtungsfaktoren:  $a_S, b_S, c_S, d_S$ ; sowie Punktgewichtungsfaktoren:  $c_P, d_P$ ) variiert werden. Eine Grundeinstellung dieser Faktoren, basierend auf Evaluationen zahlreicher Aufbauten von Rohsimulationsmodellen, bietet die Software an. Zudem stellt die Software grundlegende Simulationseinstellungen, wie Anzahl der Durchläufe, GD&T Standard, Sigma Range, Allgemeintoleranzen für Geostationen (Standardtoleranz für flächige Auflage, Standardtoleranz für Bolzenaufnahmen), zur Verfügung. Abbildung 6.38 zeigt die globalen Einstellmöglichkeiten innerhalb der Software.

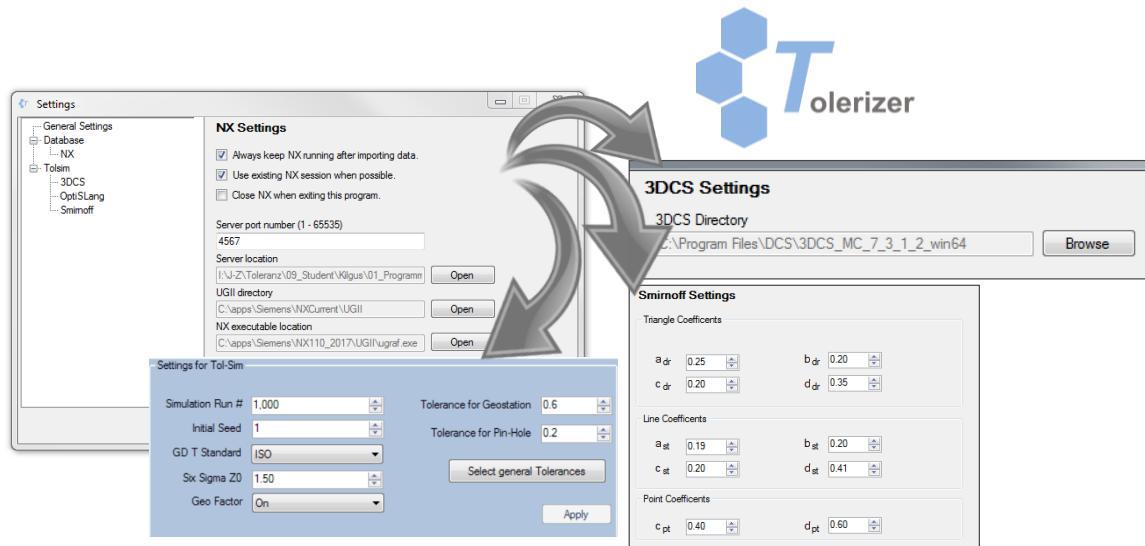


Abbildung 6.38 Globale Einstellmöglichkeiten der Software zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen

### 6.6.5.2 Lokale Einstellmöglichkeiten der Software

Möglich ist z. B. beim Aufbau des Modells eine Modifikation des Fügegraphen vorzunehmen. In ① der Abbildung 6.39 sind die entsprechenden Strukturen innerhalb der Software dazu dargestellt. Beispielsweise könnten bei der Berechnung der Zusammenbauoperationspunkte nur Bezugsstellen (FTA) oder nur Spann- und Fixierpunkte (SKF) oder nur das größtmögliche Dreieck berücksichtigt werden. Auch eine komplett manuelle Eingabe pro Zusammenbauoperation ist möglich wie ② Abbildung 6.39 zeigt.

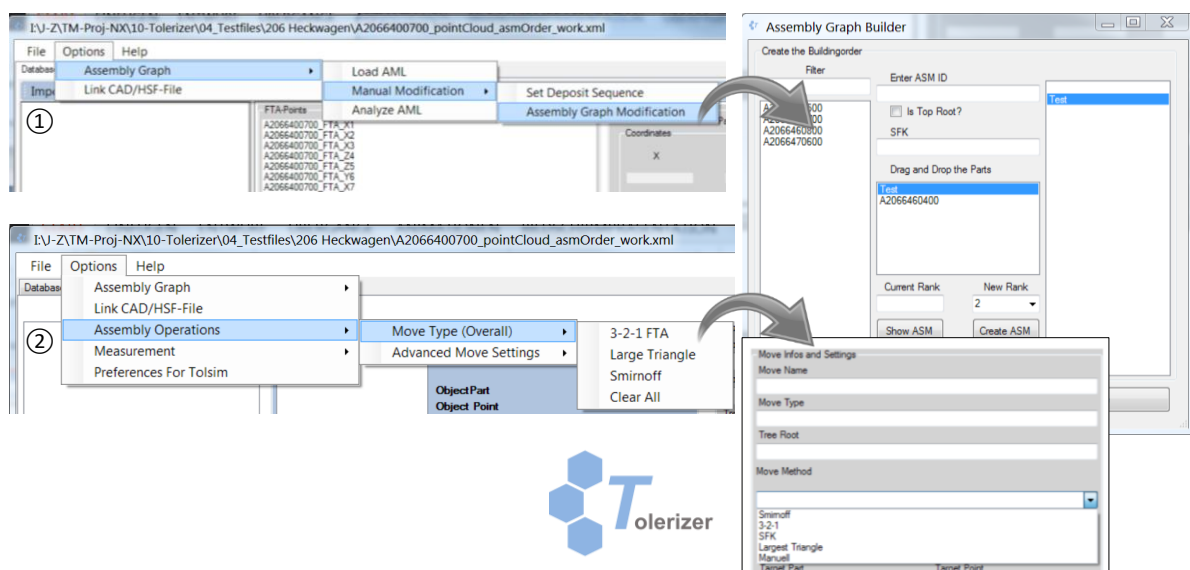


Abbildung 6.39 lokale Einstellmöglichkeiten der Software

Sind die entsprechenden Einstellungen getroffen (oder die Grundeinstellungen beibehalten), so kann ein lauffähiges Toleranzsimulationsmodell generiert werden. Die Software zum automatisierten Aufbau dieses Modells bestätigt graphisch die Bereitschaft zum Export oder Batch-Call dieses Simulationsmodells wie Abbildung 6.40 zeigt.

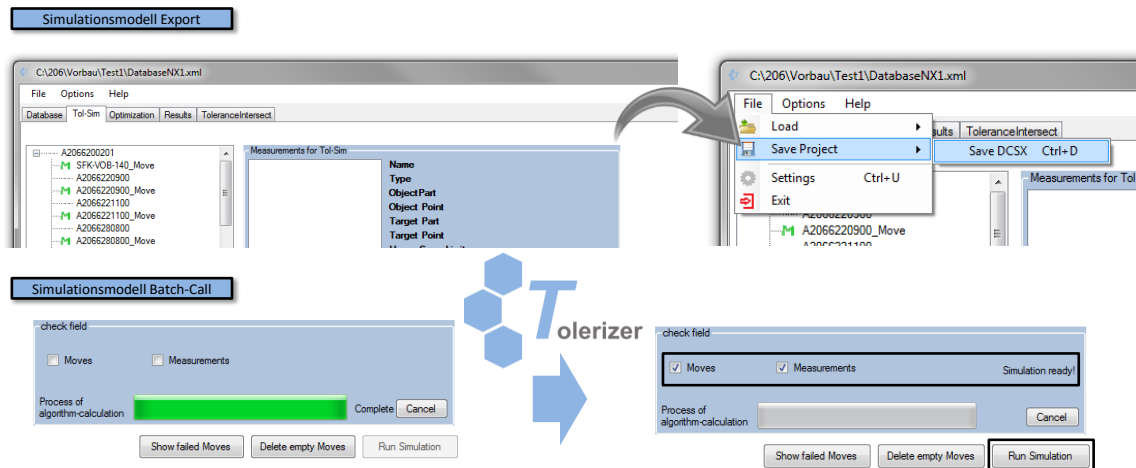


Abbildung 6.40 Export oder Batch-Call des aufgebauten Toleranzsimulationsmodells

## 6.7 Anwendungsbeispiel zum automatisierten Erstellen von Toleranzsimulationsmodellen

Nachdem die Grundlagen sowie die Zusammenhänge bei der automatisierten Modellerstellung dargelegt sind, soll nun ein Anwendungsbeispiel erläutert werden. Außerdem soll dieses mit einem manuell erstellten Toleranzsimulationsmodell verglichen und, falls vorhanden, Abweichungen in der Modellierung aufgezeigt werden.

Als Beispiel dient das in Abbildung 6.41 dargestellte Modell eines „Zusammenbau Heckmittelstück unten“. Das Modell wurde aus folgenden Gründen gewählt:

Erstens handelt es sich um eine Baugruppe, die nicht nur die linke Fahrzeugseite repräsentiert, sondern auch die spiegelbildlich rechte Seite. Dadurch beinhaltet die Baugruppe Spiegelteile, welche bei einer Modellerstellung stets mit aufgebaut werden müssen. Zudem lassen sich an den spiegelbildlichen Bauteilen relativ leicht Modellierungsunterschiede (links zu rechts) nachweisen.

Zweitens befindet sich die Baugruppe in einer nahezu parallelen Position zu einer der Hauptachsen. Dadurch fällt die Erklärbarkeit der Abweichungen bei der Analyse der Ergebnisse leichter.



Drittens sind die geometrischen Ausprägungen der Bauteile relativ groß. Damit sind Modellierungsunterschiede zwischen automatisierter Modellerstellung und manuellem Aufbau optisch einfach zu identifizieren. Abbildung 6.41 zeigt das gewählte Beispiel im Kontext des Karosserierohbaus.

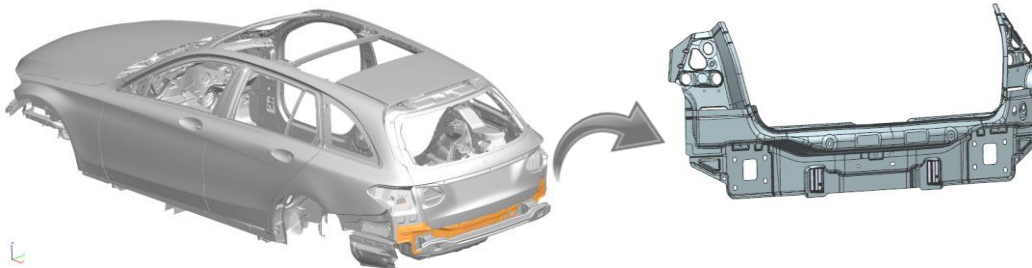


Abbildung 6.41 Demonstrator: „Zusammenbau Heckmittelstück unten“ zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen

Beim Aufbau des Modells wird die in Abbildung 6.42 dargestellte Fügefolge verwendet.

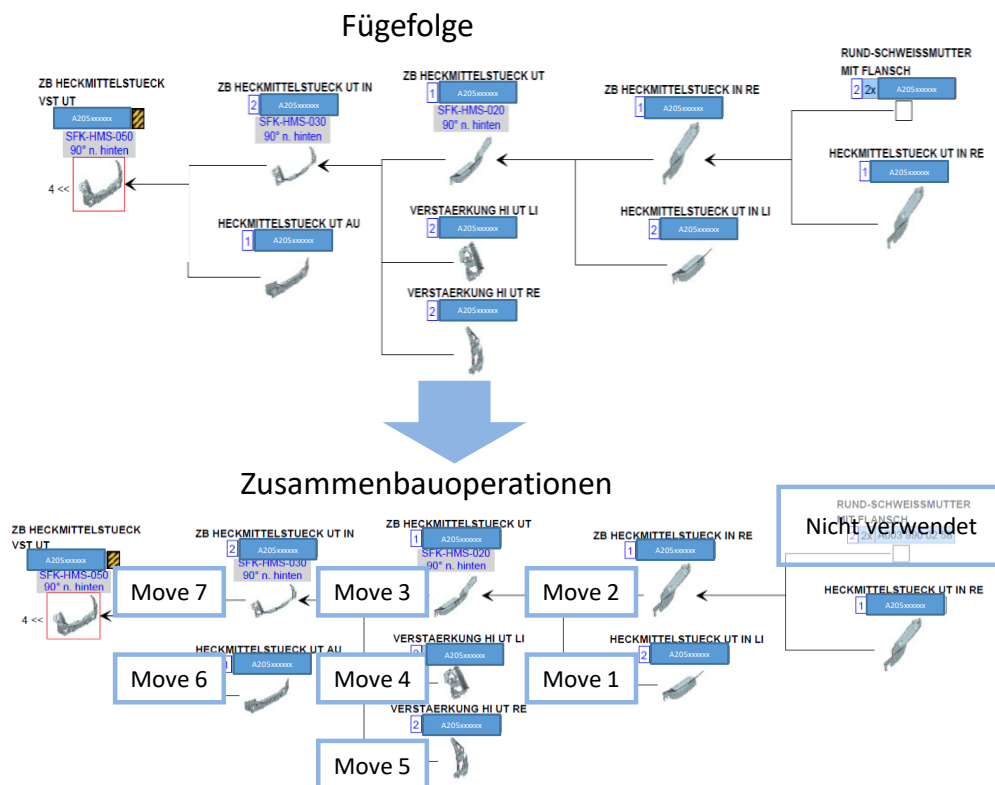


Abbildung 6.42 Fügegraph des Heckmittelstückmodells

Die Fügefolge liegt als AML-Datei vor und kann, wie in Kapitel 6.6.2 dargestellt, eingebunden werden. Bei der Überführung in das Toleranzsimulationsmodell entstehen die in Abbildung 6.42 gezeigten Zusammenbauoperationen. Der Aufbau des Modells erfolgt mithilfe des Algorithmus zum automatisierten Berechnen der Verbauoperationen aus Kapitel 6.6.4. Dazu

liegen im Modell neben dem Bezugssystem und Verbindungselementen auch Spann- und Fixierpunkte vor, wobei diese im vorliegenden Beispiel deckungsgleich auf den Bezugsstellen liegen. Deshalb werden nur Bezugsstellen sowie Verbindungselemente als Zusammenbauoperationspunkte durch den Algorithmus herangezogen.

Das nachfolgende Kapitel zeigt die schrittweise Darstellung der einzelnen Zusammenbauoperationen sowie einen direkten Vergleich zwischen automatischer und manueller Modellierung.

### 6.7.1 Vergleich der Zusammenbauoperationen am Beispiel „Zusammenbau Heckmittelstück unten“

Im ersten Schritt erfolgt der Verbau der beiden inneren Heckmittelstücke links sowie rechts (Move 1). Diese werden in eine Geostation aufgelegt und anschließend gefügt. Zur Definition der Zusammenbauoperation stehen jeweils sieben Bezugsstellen zur Verfügung (Einlegreihenfolge 1). Abbildung 6.43 zeigt die drei gewählten für die primäre Richtung, zwei für die sekundäre Richtung (Loch – Langloch) und den tertiären Punkt (Loch). Die verbleibende Bezugsstelle liegt in primärer Richtung. Sie wurde vom Algorithmus aufgrund eines weniger guten Messpunktkoeffizientens nicht herangezogen. Die Zusammenbauoperation für das rechte Bauteil fällt analog aus und ist deshalb nicht dargestellt.

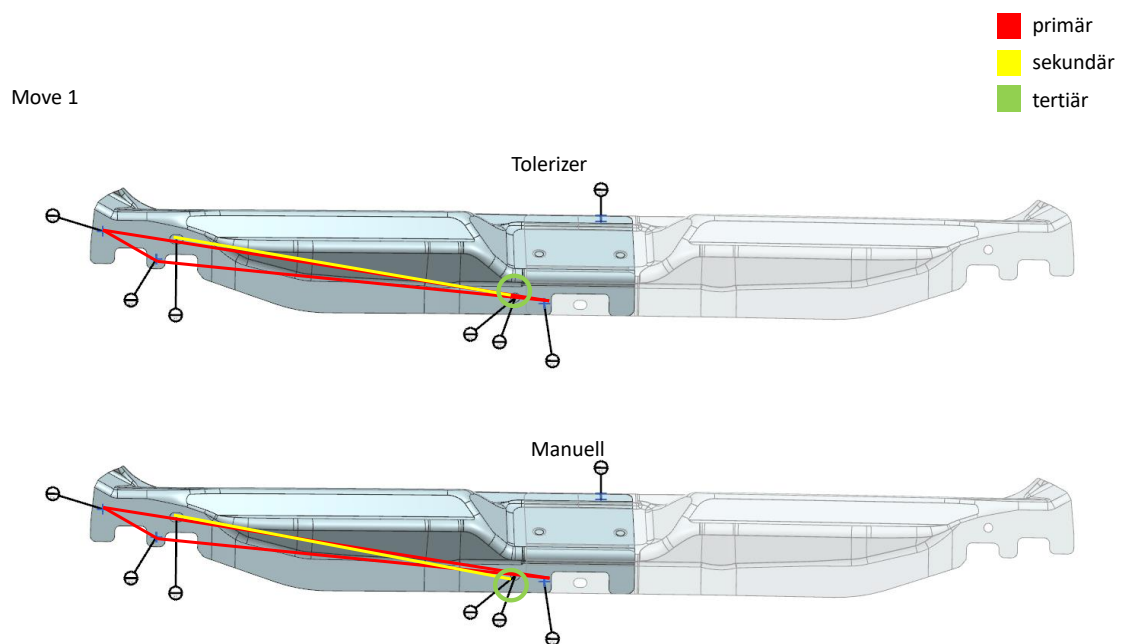


Abbildung 6.43 Punktauswahl für Zusammenbauoperation 1

Die dritte Zusammenbauoperation bildet das Auflegen des „Zusammenbaus Heckmittelstück unten“ auf die Geostation ab (Einlegreihenfolge 1). Da beim Auflegen auf die Geostation nur Bezugsstellen und Spannstellen durch den Algorithmus berücksichtigt werden, finden sich die in Abbildung 6.44 dargestellten Ausrichtpunkte. Auch in diesem Fall liegt kein Unterschied zur manuellen Modellierung vor.

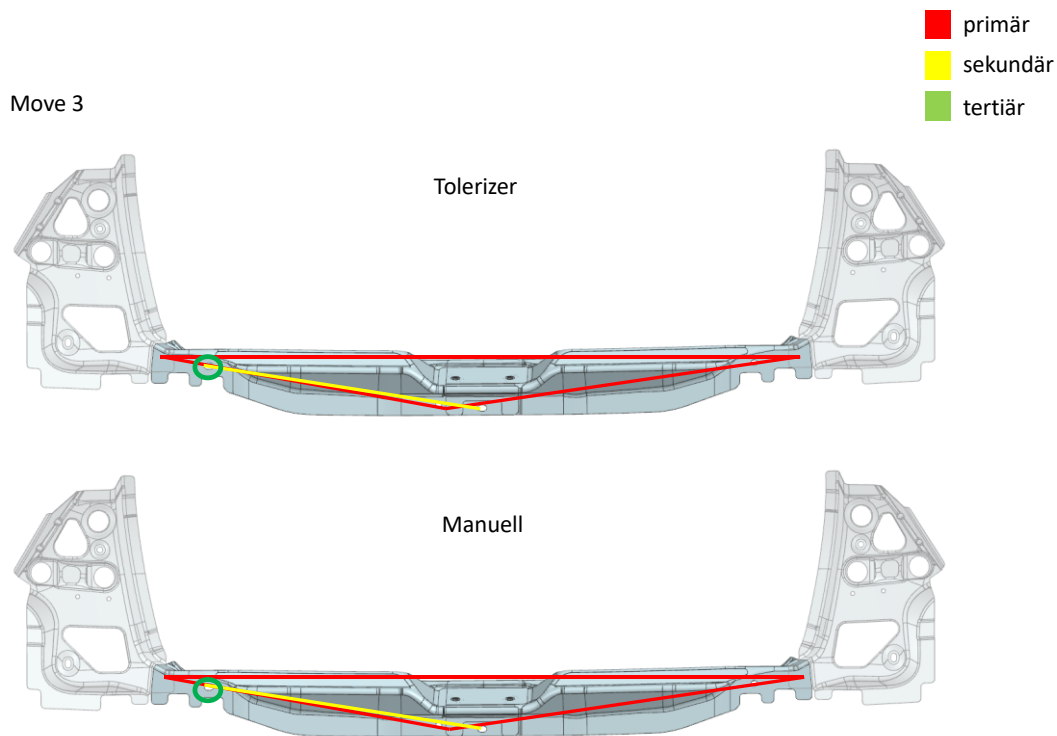


Abbildung 6.44 Punktauswahl für Zusammenbauoperation 3

In zwei weiteren gleichwertigen Zusammenbauoperationen werden die beiden Bauteile „Verstärkung hinten unten links“ sowie „Verstärkung hinten unten rechts“ gefügt (Einlegreihenfolge 2). Auch hier wird nur die linke Zusammenbauoperation beschrieben, da sich die rechte spiegelbildlich verhält. Bei der Auswahl der Zusammenbauoperationspunkte stehen Bezugsstellen sowie die Verbindungstechnik zur Verfügung. Abbildung 6.45 zeigt, dass bei der Berechnung des Movekoeffizienten für die primäre Ausrichtung ein Verbindungselement zum Einsatz kommt. Dies stellt den wesentlichen Unterschied zum manuellen Aufbau dar. Aufgrund des minimal größeren Ausrichtdreiecks sollten sich bei der späteren Betrachtung der Messergebnisse kleinere Standardabweichungen im Vergleich zum manuellen Aufbau ergeben.

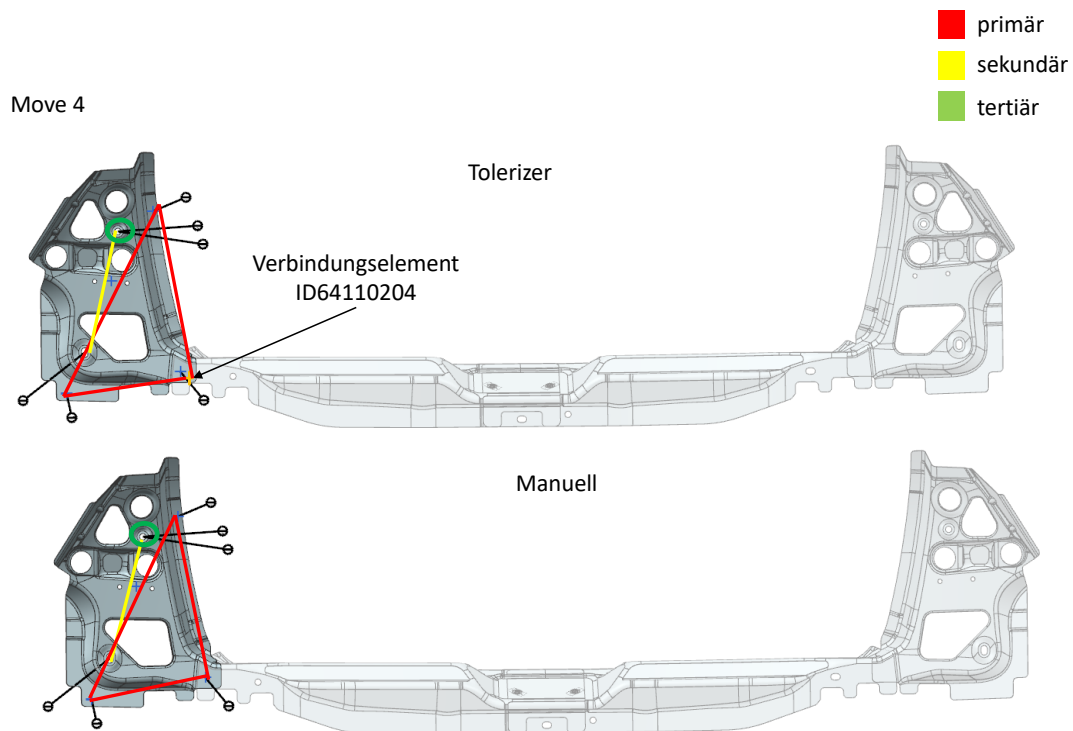


Abbildung 6.45 Punktauswahl für Zusammenbauoperation 4

In der sechsten Zusammenbauoperation erfolgt das Einlegen des „Zusammenbaus Heckmittelstück unten“ außen in die Geostation. Aufgrund der Einlegereihenfolge (Einlegereihenfolge 1) stehen wiederum nur Bezugsstellen sowie Spann- und Fixierpunkte zur Verfügung. Abbildung 6.46 zeigt sowohl die automatisch berechneten Zusammenbauoperationspunkte als auch die manuell gewählten Punkte. Auffällig ist, dass bei der manuellen Punktauswahl die Vermittlung eines primären Ausrichtpunktes erfolgt (Dyn X1-X2). Bei den Messergebnissen des Zusammenbaus ist folglich zu erwarten, dass sich die Abweichungen der linken Seite analog zur rechten Seite verhalten.

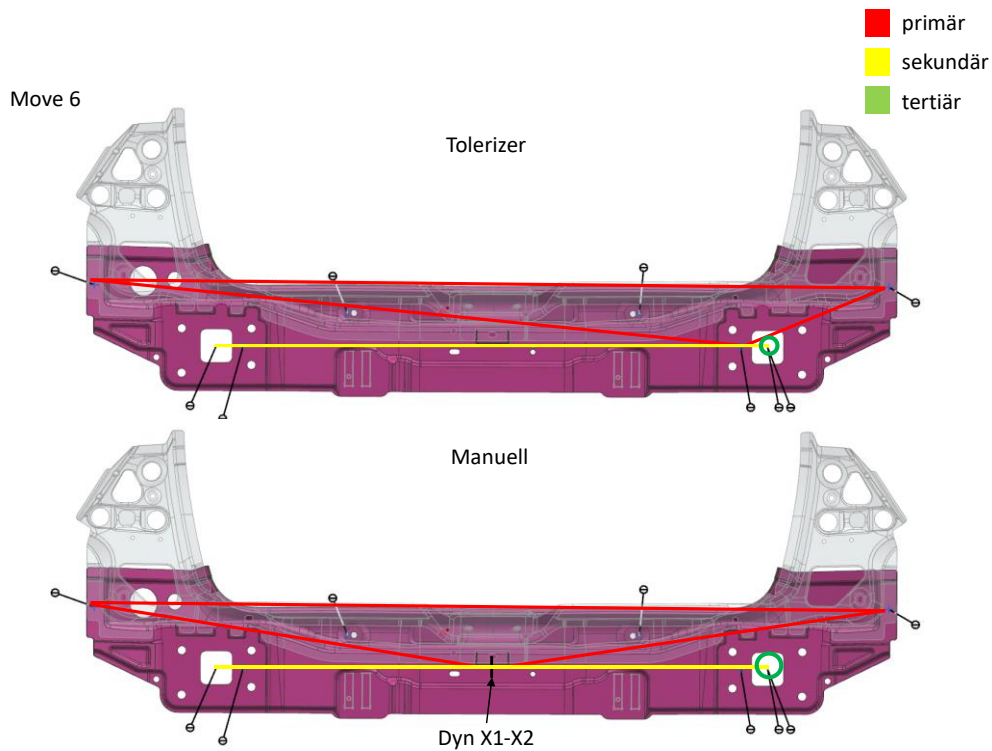


Abbildung 6.46 Punkteauswahl für Zusammenbauoperation 6

In der letzten Zusammenbauoperation der Baugruppe erfolgt das Fügen des „Zusammenbau Heckmittelstück unten innen“ auf das „Heckmittelstück unten außen“. Auch hier kann wieder die Verbindungstechnik berücksichtigt werden (Einlegreihenfolge 2). Es ergeben sich die in Abbildung 6.47 dargestellten Zusammenbauoperationspunkte.

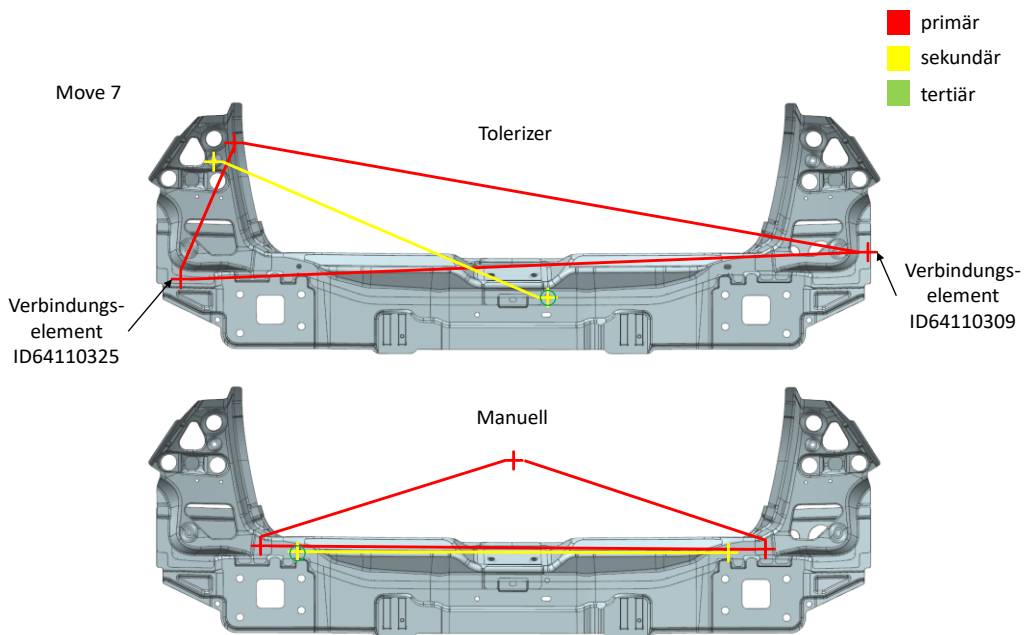


Abbildung 6.47 Punkteauswahl für Zusammenbauoperation 7

Auffällig ist auch hier, dass beim manuellen Verbau in der primären Ausrichtung ein vermittelter primärer Zusammenbauoperationspunkt verwendet wird. In der automatisiert errechneten Zusammenbauoperation dagegen werden für die primäre Ausrichtung zwei Verbindungselemente herangezogen, wodurch das Dreieck eine deutlich größere Ausprägung als beim manuellen Verbau annehmen kann. Auch in der sekundären Ausrichtung ergeben sich Unterschiede. So finden sich beim Durchlaufen des Algorithmus zwei sekundäre Punkte, die eine größere Distanz zueinander aufweisen, als die in der manuell erzeugten Zusammenbauoperation. Die Lage der sekundären Punkte im automatisierten Zusammenbau sowie das größere Dreieck in der primären Ausrichtung müssten im Vergleich zum manuell aufgebauten Modell deutlich geringere Standardabweichungen bei den Messungen auf der linken Bauteilseite ergeben. Die Messergebnisse werden im folgenden Kapitel dargestellt.

### **6.7.2 Messergebnisse des „Zusammenbau Heckmittelstück unten“**

Zur Auswertung des „Zusammenbau Heckmittelstück unten“ werden pro Seite des Zusammenbaus drei Messpunkte definiert. Diese sind jeweils in ihre drei Koordinatenrichtungen (X, Y, Z) aufgeteilt. Es erfolgt eine Messung gegen die CAD-Solllage (Messung Punkt-Nominal), wodurch sich die Standardabweichung des jeweiligen Messpunktes ermitteln lässt. Hierbei fällt auf, dass die Abweichungen im automatisiert generierten Toleranzsimulationsmodell in 14 von 18 Fällen geringer ausfallen als beim manuell aufgebauten Modell. Drei Messungen sind in etwa vergleichbar mit dem manuellen Ergebnis. In vier Fällen sind die Standardabweichungen etwas höher als im manuellen Modellaufbau (siehe Abbildung 6.48).

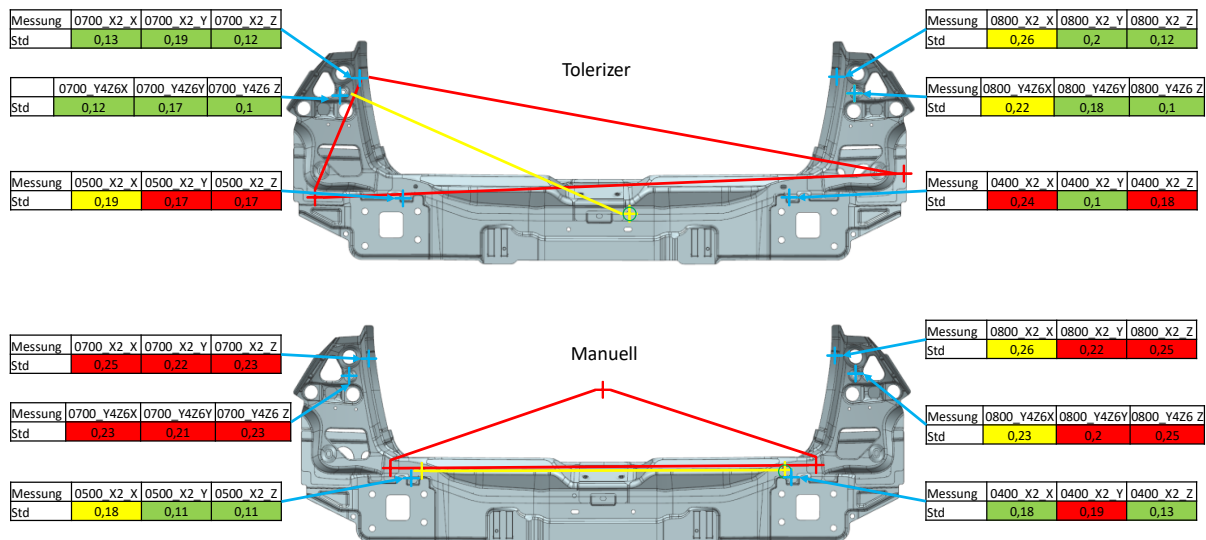


Abbildung 6.48 Standardabweichungen gegenüber CAD-Solllage des „Zusammenbau Heckmittelstück unten“

Der Hauptgrund für die etwas geringeren Standardabweichungen liegt in den größeren Ausrichtdreiecken in primärer Richtung. Durch die Verwendung von Verbindungselementen konnten die Ausrichtflächen gegenüber dem manuellen Simulationsmodell aufbau vergrößert werden. Toleranzen, die außerhalb der Ausrichtfläche liegen, weisen damit einen geringeren Hebel auf und bewirken so eine weniger starke Streuung. Der Vergleich der Messergebnisse der linken zur rechten Seite zeigt, dass die Verwendung von vermittelten Ausrichtpunkten zu relativ ausgewogenen Ergebnissen führt. Im automatisch erstellten Simulationsmodell liegt diese Vermittlung nicht vor, sodass hier lediglich auf der linken Modellseite geringe Streuungen auftreten. Der Algorithmus zur Berechnung der Zusammenbauoperationspunkte sollte bei symmetrischen Bauteilen also angepasst werden.

## 7 Konzeptvalidierung des methodischen Ansatzes zur Kopplung eines Optimierers

### 7.1 Konzept zur Umsetzung im produzierenden Unternehmen

Auch bei Kopplung des Optimierungsprogrammsystems wird die Systemlandschaft der Daimler AG exemplarisch herangezogen. Die Eingangsdaten der in Kapitel 0 dargestellten Parameter sowie die Zielgrößen aus Fugen- und Radienplan und dem Funktionsmaßkatalog bilden die Grundlage für die Optimierung. Als Optimierungsprogrammsystem kommt die Software optiSlang der Firma Dynardo GmbH zum Einsatz. Diese besitzt keine direkte Kopplung zum PDM, CAD oder CAT-System der Daimler AG; allerdings bietet sie die Möglichkeit durch eine Python und C++ Schnittstelle benutzerdefiniert Features der Software anzusprechen [Dyna]. Dies erlaubt den Aufbau von definierten Workflows während der Laufzeit des Tools zur Optimierung von Toleranzsimulationsmodellen. Abbildung 7.1 zeigt die Einbindung in die Daimler Systemlandschaft.

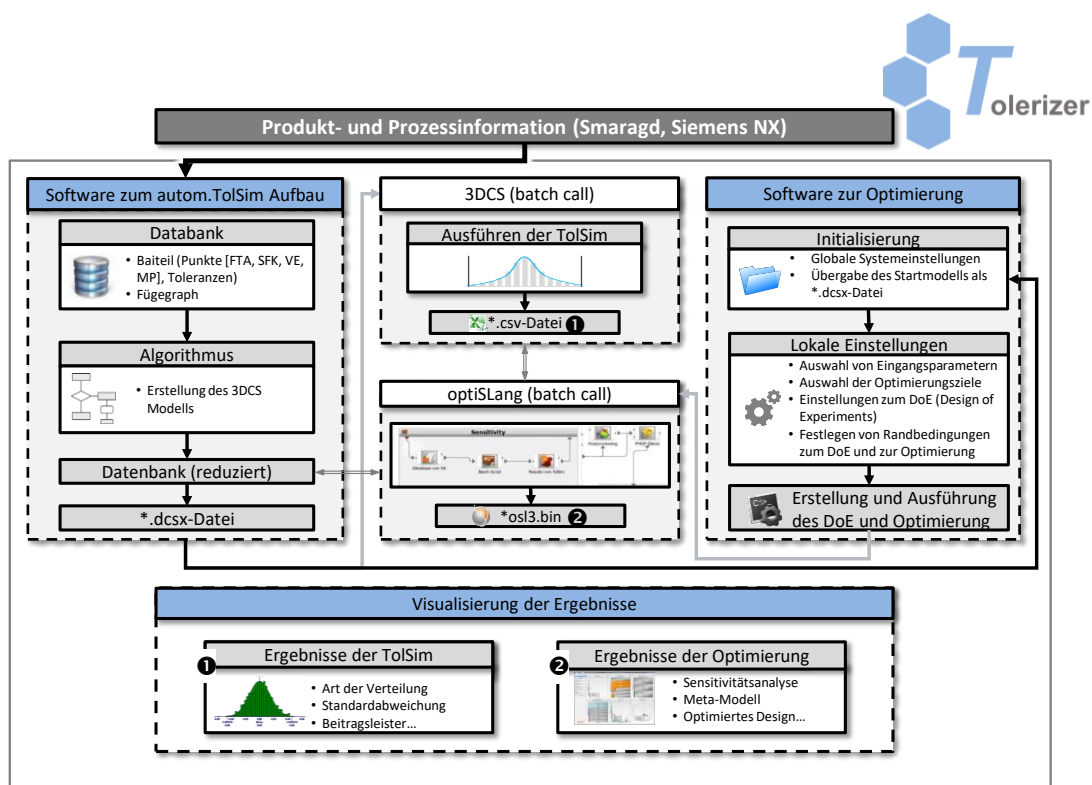


Abbildung 7.1 Einbindung des Optimierungsprogrammsystems in den Tolerizer

Zu Beginn erfolgt eine Übergabe des initialen Designs (erstes Toleranzsimulationsmodell) an die Software zur Optimierung. Nachdem der Nutzer die zu variierenden Parameter ausgewählt



und das Optimierungsziel festgelegt hat, erfolgt die Erstellung sowie Ausführung eines Python Skripts. Dieses generiert bei Übergabe an optiSLang den entsprechenden Workflow (z. B. DoE oder Optimierung) und führt ihn im Batch-Call aus. Da pro Design eine erneute Toleranzsimulation notwendig ist, erfolgt im ersten Schritt die Anpassung der Parameter innerhalb der reduzierten XML-Datenbank und anschließend ein erneutes Ausführen der Toleranzsimulation (im Batch-Call). Sind alle notwendigen Designs berechnet, können die Ergebnisse der Optimierung dargestellt werden (siehe ② in Abbildung 7.1)

## 7.2 Software zur Optimierung von Toleranzsimulationsmodellen

### 7.2.1 Datengrundlage

Ähnlich wie die Software zum automatisierten Aufbau von Toleranzsimulationsmodellen benötigt auch die Software zum Durchführen der Optimierung von Toleranzsimulationsmodellen eine spezifische Datengrundlage. Das in Kapitel 6.5 vorgestellte Konzept der XML-Datenbank wurde so aufgebaut, dass es auch diesen Anforderungen genügt. Zur Durchführung von Variationsanalysen müssen einige der oben angeführten Segmente der XML-Datenbank bereits mit Informationen gefüllt sein. Diese Segmente werden nachfolgend beschrieben. Bei der Auswahl der Parameter wird auf die Segmente <Point\_Info> sowie <Tolerances> zugegriffen. Nach der Auswahl der Parameter durch den Nutzer (beschrieben in Kapitel 7.2.2.2) wird eine Verknüpfung im Segment der Parameter der <Var\_Analysis\_Settings> erzeugt (siehe Abbildung 7.2).

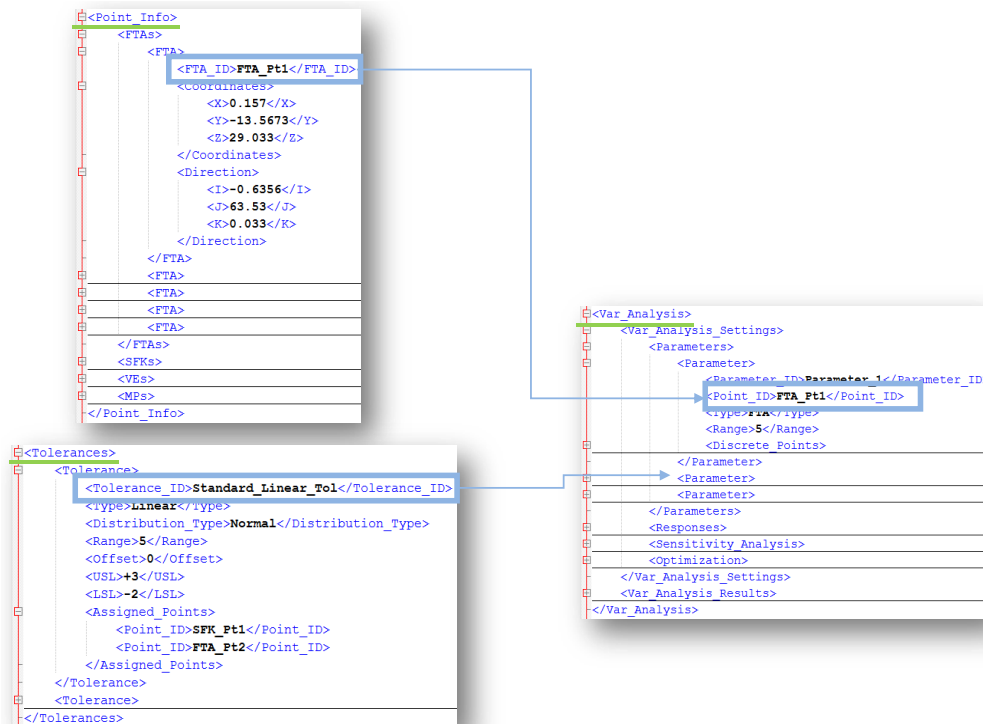


Abbildung 7.2 Parameterselektion in der XML-Datenbank

Einige der Segmente in der XML-Datenbank erfahren beim Erstellen sowie bei der Durchführung der Variationsanalyse oder bei der Optimierung eine Modifikation. Entsprechende Bereiche zeigt Abbildung 7.3. Folgende Bereiche sind betroffen: Zum einen das Segment des Qualitätsmerkmals ① (Zielgröße der Variationsanalyse, Optimierung), zum anderen um den Bereich der Einstellungen für eine Sensitivitätsanalyse oder Optimierung ②. Auch die Ergebnisse nach erfolgreicher Durchführung der Variationsanalyse und Optimierung lassen sich in der XML-Datenbank ablegen ③. Innerhalb der Segmente <Parts> und <Geo\_Parts> erfolgt eine Modifikation, die im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird.

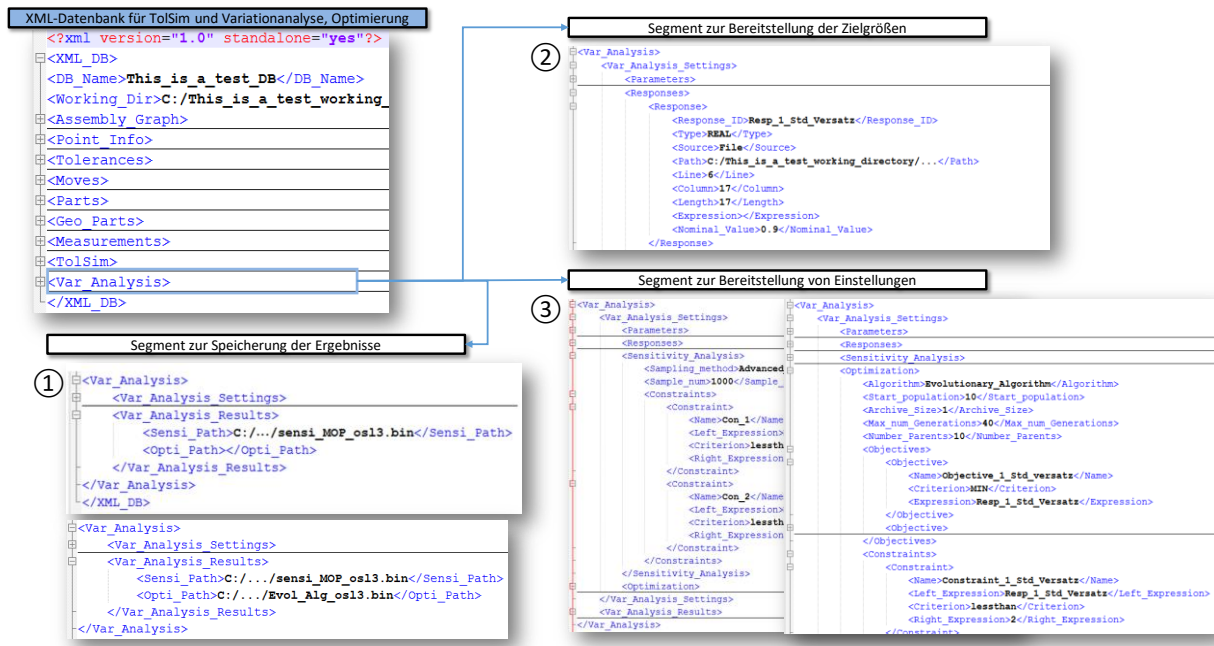


Abbildung 7.3 Modifizierte Bereiche der XML-Datenbank zur Variationsanalyse, Optimierung

## 7.2.2 Methode zur Durchführung von Variationsanalysen an Toleranzsimulationsmodellen sowie initiale Einstellungen

Um eine Variationsanalyse basierend auf den Eingangsparametern der Toleranzsimulation durchführen zu können, müssen diese eine entsprechende Variation erfahren. Zur Sicherstellung, dass bei der Variation der Koordinaten von Bezugsstellen, Spann- und Fixierpunkten oder Verbindungspunkten stets ein Flächenbezug vorliegt, wird die nachfolgende Methode implementiert.

### 7.2.2.1 Verwendung der Punktwolke pro Bauteil

Zu Beginn jeder Toleranzsimulation oder Optimierung erfolgt der Datenabzug aus dem CAD-System. Ist eine Optimierung von Eingangsparametern vorgesehen, werden verschiedene Positionen der eingangs erwähnten Punkte benötigt. Dies wird durch das Erzeugen einer Punktwolke pro Bezugsstelle, Spann- und Fixierstelle oder Verbindungsstelle erreicht. Im initialen 3D-CAD-Modell ist jedem dieser Punkte eine eindeutige Bauteilfläche zugeordnet (bei Verbindungspunkten eine Bauteilfläche pro verbundenem Bauteil). Sollte einer der Punkte keinen direkten Flächenkontakt besitzen, so kann mittels einer Abstandsberechnung die nächstgelegene Fläche des Bauteils ermittelt werden. Anschließend kann durch die NX Methode <ComputePointCloud> eine Sammlung von Punkten pro Fläche erfolgen, wobei die Fläche in 2D-Koordinaten mit den Parametern U und V aufgeteilt wird. Der Abstand des entstehenden Netzes an Punkten (Punktabstand) kann durch den Nutzer festgelegt werden

(vgl. Kapitel 7.2.2.2). Da der Abstand zwischen zwei Punkten mit U- und V-Koordinaten nicht dem Abstand im globalen Koordinatensystem entspricht, muss hier noch eine Skalierung pro Parameter erfolgen. Durch die NX Methode <ComputePointCloud> finden sich auch Punkte, die jenseits der eigentlichen Bauteilfläche liegen. Diese referenzieren auf den unbeschnittenen Ursprungszustand der Bauteilfläche. Durch eine nachgelagerte Abfrage (Abfrage, ob der aktuelle Punkt in der Fläche liegt) können diese Punkte identifiziert und aus der Punktwolke entfernt werden. Abbildung 7.4 zeigt die Punktwolke eines Bezugspunktes (grün sind gültige Punkte der Punktwolke des Bauteils, rot ungültige, letztere liegen außerhalb der eigentlichen Bauteilfläche).

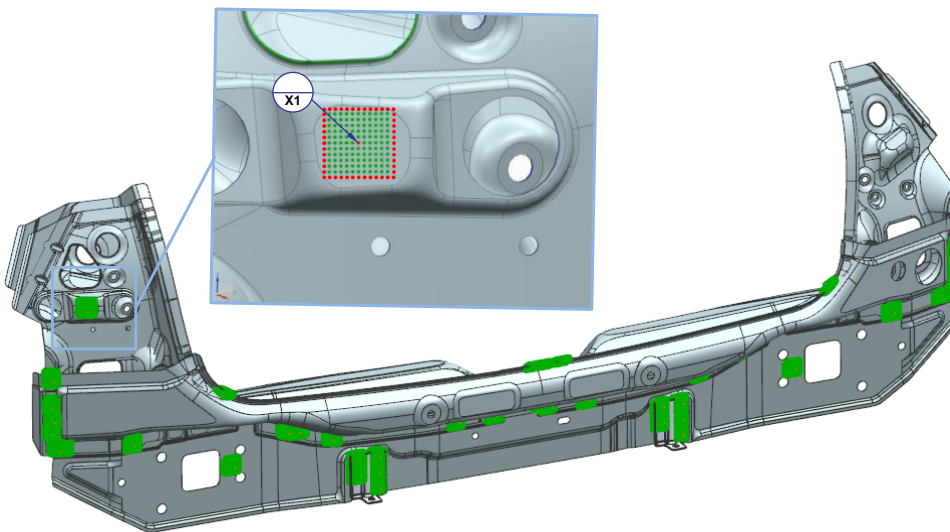


Abbildung 7.4 Punktwolke einer Bezugsstelle mit gültigen und ungültigen Punkten

Die Koordinaten sowie Richtungsvektoren der gültigen Punkte der Punktwolke werden dann in der XML-Datenbank abgelegt (vgl. Abbildung 6.28).

### 7.2.2.2 Initiale Einstellungen des Nutzers

Beim Ausführen einer Variationsanalyse müssen durch den Nutzer zunächst die Grenzen der Punktwolke sowie deren Auflösung festgelegt werden (siehe ① in Abbildung 7.5). Anschließend muss der Pfad zum Ausführen des Optimierungsprogrammsystems (optiSLang) festgelegt und ein Arbeitsverzeichnis gesetzt werden. Nachdem ein Toleranzsimulationsmodell erfolgreich erstellt worden ist (vgl. Kapitel 6), kann eine Variationsanalyse durchgeführt werden. Parameter, welche eine Variation erfahren sollen, müssen durch den Nutzer ausgewählt und mit einer erlaubten Variationsgröße (Range) beaufschlagt werden (vgl. ② in Abbildung 7.5). Auch die Zielgröße(n) müssen durch den

Nutzer gesetzt werden (vgl. ③ in Abbildung 7.5). Ferner können noch Einstellungen, wie z. B. die Art der Variationsmethode in der Variationsanalyse oder die Anzahl der Durchläufe, getroffen werden (vgl. ④).

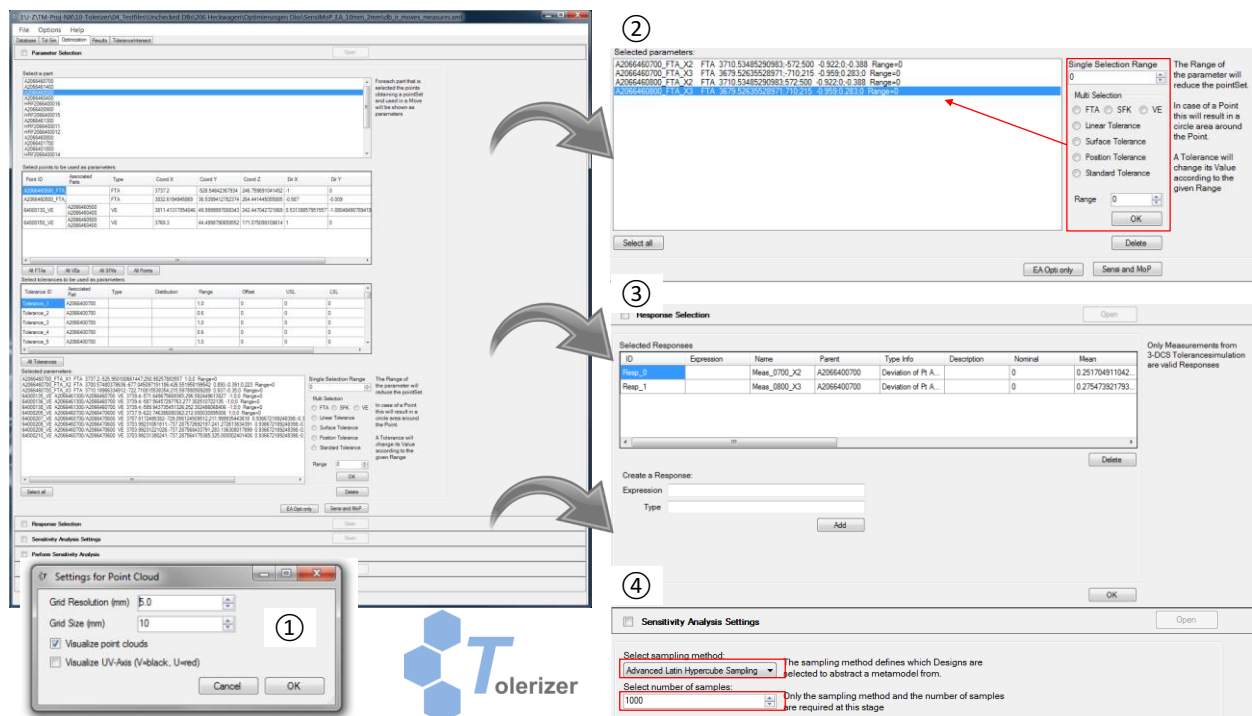


Abbildung 7.5 Einstell- und Eingriffsmöglichkeiten während der Durchführung von Variationsanalysen bei Toleranzsimulationsmodellen

Anschließend ist der Durchlauf der Variationsanalyse möglich. Die Abläufe beim Durchlauf sind im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

### 7.2.2.3 Softwareinterner Ablauf

Nachdem alle Einstellungen getroffen worden sind, erfolgt zunächst die Erstellung einer Ordnerstruktur (① in Abbildung 7.6) im gewählten Arbeitsverzeichnis. Dies ist notwendig, um die Ergebnisse der einzelnen Durchläufe strukturiert ablegen zu können. Weiterhin erzeugt die Software zur Optimierung von Toleranzsimulationsmodellen die Python-Skripte zum Aufsetzen der Variationsanalyse in optiSLang und führt diese aus (② in Abbildung 7.6). Dabei erfolgt die Registrierung der Parameter sowie ihrer möglichen Zustände (wie Punktwolke oder Spannweite bei der Optimierung von Toleranzen) in optiSLang. Zudem werden die Zielgrößen in optiSLang registriert. Danach kann die Optimierungssoftware nach der definierten Methode beginnen, das Sampling aufzubauen. Pro Durchlauf werden dazu die gewählten Zustände der Parameter (definierter Punkt der Punktwolke pro Parameter oder definierte Toleranzwerte) an die Software Tolerizer übergeben (\*.tmp-Datei im jeweiligen

Design des Arbeitsverzeichnisses – siehe ③ in Abbildung 7.6). Innerhalb der Software Tolerizer erfolgt nun ein Austausch der Punktkoordinaten im Segment <Point\_Info> des jeweiligen Parameters oder aber ein Ändern der Spannweite der definierten Toleranz innerhalb des Segments <Tolerances> (siehe ④ in Abbildung 7.6). Anschließend erfolgt ein erneuter Durchlauf des Reduzierungsalgorithmus aus Kapitel 6. Danach liegt ein simulationsfähiges Toleranzsimulationsmodell vor. Dieses wird durch einen Batch-Call der Toleranzsimulationssoftware berechnet und die Ergebnisse an optiSLang übergeben (siehe ⑤ in Abbildung 7.6). Damit endet die Berechnung eines konkreten Designs. Diese Prozedur wiederholt sich für alle von optiSLang benötigten Variationen (siehe ⑥ in Abbildung 7.6). Schlussendlich erfolgt die Bereitstellung der Sensitivitätsergebnisse sowie die Berechnung eines Metamodells durch die Optimierungssoftware (siehe ⑦ in Abbildung 7.6). Abschließend werden diese Ergebnisse in der XML-Datenbank hinterlegt (siehe ⑧ in Abbildung 7.6). Abbildung 7.6 zeigt den softwareinternen Ablauf.

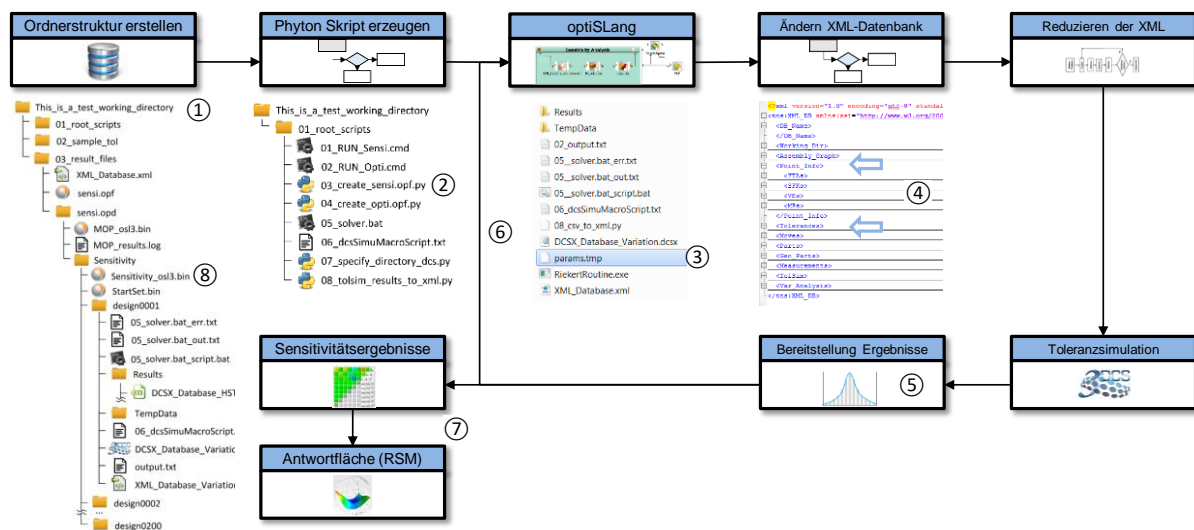


Abbildung 7.6 Softwareinterner Ablauf der Variationsanalyse

### 7.2.3 Methode zur Durchführung von Optimierungen an Toleranzsimulationsmodellen, initiale Einstellungen

Neben der Variationsanalyse bietet die Software zum Optimieren von Toleranzsimulationsmodellen auch die Möglichkeit einer Modelloptimierung. Es werden also nicht nur die Hauptbeitragsleister der Streuung einer Toleranzsimulation aufgezeigt, sondern auch mögliche Variationen dazu, um so beispielsweise eine Minimierung der Streuung aller Zielgrößen zu erreichen. Nachfolgend werden die initialen Einstellmöglichkeiten des Nutzers aufgezeigt.

### 7.2.3.1 Initiale Einstellmöglichkeiten des Nutzers

Beim Durchführen einer Optimierung des Toleranzsimulationsmodelles muss zum einen die Auswahl des geeigneten Optimierungsalgorithmus getroffen werden. Im Hinblick auf die große Anzahl an Eingangsparametern bietet die Software Tolerizer hier naturanaloge Verfahren an, wie den evolutionären Algorithmus oder die Partikelschwarm-Optimierung. Zum anderen müssen für den selektierten Optimierungsalgorithmus Einstellungen wie z. B. die Populationsgröße, die maximale Anzahl an Generationen, die Anzahl der Elterngenerationen etc. getroffen werden. Wichtig ist zudem die Definition eines konkreten Optimierungsziels. Im Hinblick auf die Optimierung eines Toleranzsimulationsmodelles von Fahrzeugfugen bietet sich die Minimierung der Standardabweichung von Fugentoleranzen an. Zudem können Abbruchkriterien für die Optimierung definiert werden (z. B. „Optimiere bis die Standardabweichung der Streuung aller simulationsrelevanter Fugen um 10% minimiert wurde.“). Diese Einstellungsmöglichkeiten bietet die Software Tolerizer (vgl. Abbildung 7.7).

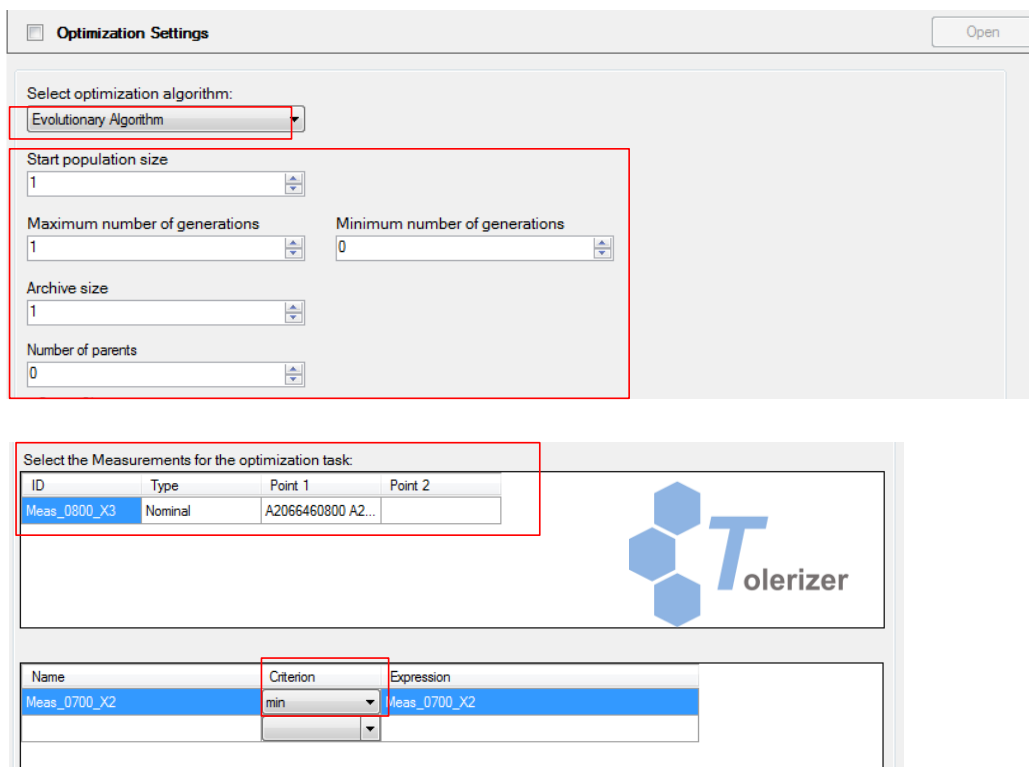


Abbildung 7.7 Initiale Einstellmöglichkeiten beim Durchführen von Optimierungen

### 7.2.3.2 Softwareinterner Ablauf

Die getroffenen Einstellungen des Nutzers werden in der XML-Datenbank des Tolerizers abgelegt (vgl. Kapitel 7.2.1). Ein Python Skript zum Aufbau der Optimierung in optiSLang wird generiert und ausgeführt. Basierend auf dem Metamodell der Variationsanalyse beginnt der







Zur Überprüfung des Erreichens des Optimierungsziels dienen die in Abbildung 7.9 dargestellten Messungen am „Zusammenbau Heckmittelstück unten“. Als Optimierungsziel soll eine Minimierung der Standardabweichung aller Messrichtungen der beiden Messungen im 10% vom Istwert gelten.

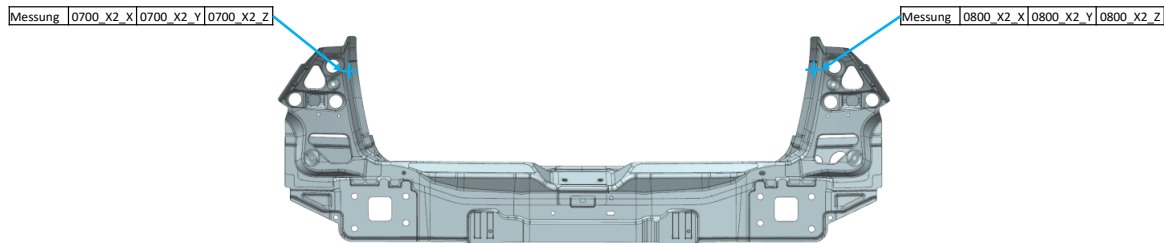


Abbildung 7.9 Messungen zur Optimierung am „Zusammenbau Heckmittelstück unten“

Vorbereitende Einstellungen, die der Nutzer beim Auslesen der Daten durchführen muss, sind bereits in Kapitel 7.2.3.1 aufgezeigt worden. Im vorliegenden Beispiel wird so die Größe der Punktwolke auf einen Durchmesser von  $40\text{mm}$  beschränkt, wobei die Rasterung der Punkte (kürzeste Abstände der Punkte zueinander) auf  $5\text{mm}$  gesetzt wird. Als erlaubter Optimierungsspielraum wird dem System (Tolerizer) ebenfalls ein Wert von  $40\text{mm}$  übergeben. Zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse wird ein Advanced Latin Hypercube Verfahren angewandt. Dabei erfolgt der Aufbau von 300 Designs. Nachdem so das Antwortflächenmodell generiert worden ist, kann darauf basierend die Optimierung stattfinden. Dazu wird im vorliegenden Beispiel ein evolutionärer Algorithmus herangezogen. Dieser besitzt eine Startpopulation der Größe  $I_{Ind} = 10$ . Die maximale Anzahl an erzeugten Generationen soll den Wert  $G_{max} = 30$  nicht übersteigen; allerdings müssen mindestens 10 Generationen erzeugt werden ( $G_{min} = 10$ ). Zudem hat die Anzahl der Eltern den Wert  $E = 10$ . Durch die gewählten Optimierungsparameter erfolgen in den Aufbausritten „Move 6“ und „Move 7“ sowie „Move 4“ und „Move 5“ Änderungen bei der Bauteilaufnahme. Dies führt zu einem parameterabhängigen Streuverhalten (vgl. Aufbausritte aus Abbildung 6.42).

### 7.3.2 Optimierungsergebnisse am Beispiel „Zusammenbau Heckmittelstück unten“

Nachdem die im vorigen Kapitel erforderlichen Einstellungen sowie die Optimierungsparameter und Optimierungsziele definiert worden sind, werden die Ergebnisse der Optimierung am Beispiel „Zusammenbau Heckmittelstück unten“ aufgezeigt. Da es sich um eine multikriterielle Optimierung handelt, ist die Auswahl eines optimalen Designs nicht möglich. Vielmehr erfolgt die Designwahl aus einer breiten Front von geeigneten Designs

(Paretofront<sup>16</sup>). Dabei hilft beispielsweise eine Nutzwertanalyse nach VDI2225. Abbildung 7.10 zeigt eine mögliche Darstellung der Paretofront (siehe ① rechts in Abbildung 7.10). Aus dieser Front werden im vorliegenden Beispiel zwei Designs ausgewählt und deren Optimierungsergebnisse im CAD-System visualisiert (siehe ② und ③ in Abbildung 7.10).

In beiden Designs ist auffällig, dass der Ausrichtpunkt X9 im „Heckmittelstück unten außen“ beim Verbau („Move 6“) eine Verschiebung nach Fahrzeug oben (positive Z-Richtung) erfahren soll. Im Gegenzug dazu sollen die Bauteil „Verstärkung hinten unten links / rechts“ auf einer größeren X-Basis positioniert werden („Move 4/5“). So lässt sich die Streuung in X-Richtung am Zusammenbau durch eine kleinere Hebelwirkung minimieren. Eine Minimierung der Streuung in Y-Richtung wird durch die Verschiebung der Fügetechnik beim Erstellen des „Zusammenbau Heckmittelstück unten“ („Move 7“) erreicht. Durch diese Maßnahmen können die Standardabweichungen der Messungen um etwa 10% verringert werden.

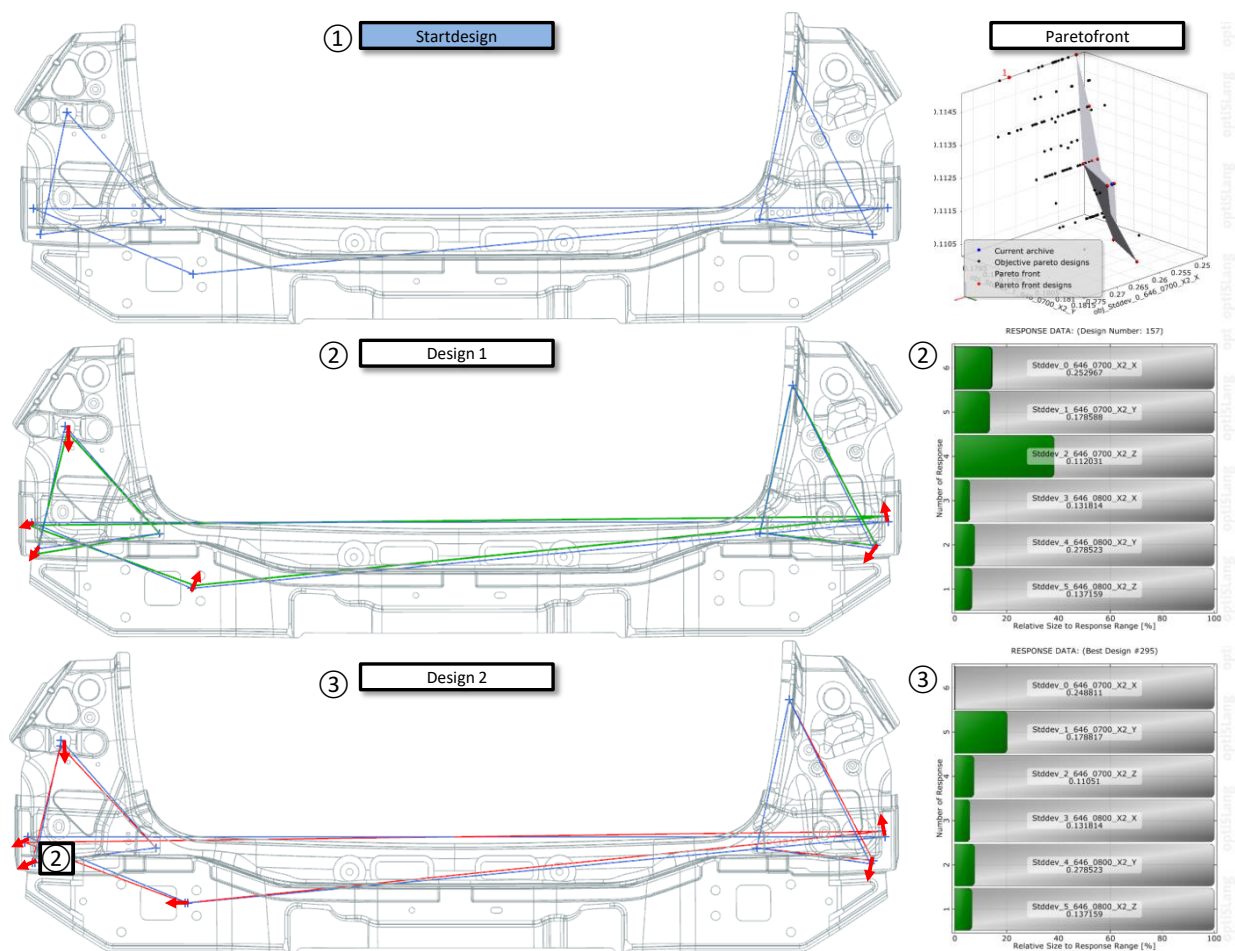


Abbildung 7.10 Optimierungsergebnisse am Beispiel „Zusammenbau Heckmittelstück unten“

<sup>16</sup> Unter einer Paretofront versteht man die Menge alle Lösungen, bei denen die Verbesserung eines Kriteriums nur auf Kosten eines anderen möglich ist. [Litt]



## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

### **8.1 Zusammenfassung**

Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Erarbeitung eines Konzepts zur Optimierung von dünnwandigen Blechbauteilen des Karosserierohbaus mithilfe von Toleranzanalysen. Dabei werden die erforderlichen Informationen beschrieben, die zum Aufbau solcher Simulationsmodelle notwendig sind. Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Entstehungsprozess sowie einer digitalen Verarbeitbarkeit dieser Informationen. Außerdem wird eine systemtechnische Umsetzbarkeit des erarbeiteten Konzepts aufgezeigt. Es werden einerseits Prozesse definiert, die eine digitale Durchgängigkeit der Informationen sowie deren Abstimmung im Produktentwicklungsprozess erleichtern, andererseits Methoden erarbeitet, um bisher nicht verfügbare Informationen digital erfassbar zu machen. Auch Schnittstellen zwischen Systemen werden spezifiziert, die bisher nicht miteinander interagierten. In Kapitel 2 schließt sich dazu ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik und industriellen Praxis an. Die vorliegenden Defizite sind in Kapitel 3 dargestellt und führen zur Formulierung der relevanten Forschungsfragen. Die ausgearbeitete Methodik adressiert im Gesteherungsprozess vor allem die Produktentwicklung und Konstruktion; aber auch der Produktionsplanung. Im Wesentlichen beruht die Gesamtmethodik auf zwei Bausteinen.

Der erste Baustein beinhaltet die Methodik zum automatisierten Erstellen von Toleranzsimulationsmodellen aus vorhandenen Produkt- und Prozessdaten. Darin bildet der Algorithmus zur Übergabe der Informationen an die Toleranzsimulationssoftware den Kernbestandteil. Daneben werden Konzepte zur digitalen Erfassbarkeit von Informationen erarbeitet. In der vorliegenden Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf der Betrachtung von statisch bestimmten, punktbasierten Simulationsmodellen, die mithilfe eines Reduzierungsalgorithmus aufgebaut werden. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit kann im Rahmen von weiteren Forschungsarbeiten das Konzept auch auf andere Modellierungsmethoden (elastisch, featurebasiert) übertragen werden.

Der zweite Baustein enthält die Methodik zur Kopplung eines Optimierungsprogrammsystems. Dabei werden Informationen zum Aufbau der Toleranzsimulationsmodelle an ein Optimierungsprogrammssystem übergeben und im Rahmen einer Variationsanalyse auf deren Sensitivität gegenüber definierter Zielgrößen

untersucht. Durch das Ausführen eines Design of Experiments kann ein Antwortflächenmodell generiert werden. Die Anwendung von evolutionären Algorithmen auf diesem Antwortflächenmodell liefert eine optimierte Abwandlung der Informationen zum Aufbau der Toleranzsimulationsmodelle, sodass die Zielgrößen bei einem erneuten Simulationsdurchlauf erreicht werden.

Eine detaillierte Beschreibung der Methodik findet sich in Kapitel 4. Einen weiteren Kernbestandteil der Arbeit bildet die in Kapitel 6 beschriebene Konzeptvalidierung. Die Umsetzbarkeit der erarbeiteten Methodik wird mithilfe einer softwaretechnischen Lösung aufgezeigt und anhand von digitalen Karosserierohbauteilen validiert. Im Fokus steht dabei neben der Anwendbarkeit der Software auch die Überprüfung der entwickelten Methoden.

## 8.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Die in Kapitel 1 der Arbeit formulierte zentrale Forschungsfrage wird nach der Sichtung der Defizite im Stand der Technik und industriellen Praxis in Kapitel 3 der Arbeit differenzierter untersucht. Die in Kapitel 5 und 6 dargestellten Methoden und Konzepte dienen der Beantwortung der formulierten Forschungsfragen. Ein Forschungsfortschritt kann mithilfe der in Kapitel 3 erwähnten Erfolgskriterien festgestellt werden, denen entsprechende Beitragsleister nach dem „Initial Impact Modells“ nach [Bless] zugrunde liegen. Auch diese wurden zu den einzelnen Forschungsfragen definiert. Ein hoher Erfüllungsgrad der Beitragsleister führt damit zur Erfüllung des Erfolgskriteriums und damit zu einem Fortschritt der Forschung.

**Frage Information 1:** *Ist es möglich die Aufbaureihenfolge sowie Metadaten im Spann- und Fixierkonzept zu speichern, sodass Folgeprozesse wie das Toleranzmanagement diese Informationen nutzen können?*

Im Rahmen der Arbeit wird ein Konzept dargestellt, um die Aufbaureihenfolge innerhalb einer AML-Datei abzubilden. Dabei wird mit verschiedenen Bibliotheken, wie der Instanzhierarchie, der Systemeinheitsbibliothek, der Rollenklassenbibliothek und der Schnittstellenbibliothek gearbeitet. So lassen sich alle relevanten Sichten (wie z. B. Produktsicht, Prozesssicht, Ressourcensicht) auf ein Produkt realisieren und in einem XML-basierten Datenformat archivieren. Um Metadaten im Spann- und Fixierkonzept bereitzustellen, wird ein Konzept entwickelt, das innerhalb der CAD-Features des Spann- und Fixierkonzepts weitere Attribute

definiert, welche Metadaten aufnehmen können (z. B. Verbindungspartner, Einlegereihenfolge etc.). Dieses Konzept erlaubt es zudem auf die Aufbaureihenfolge rückzuschließen.

**Frage Information 2:** *Wie lassen sich funktionale und optische Merkmale im 3D-Mastermodell speichern sodass Folgeprozessen wie das Toleranzmanagement diese nutzen können?*

Ein Konzept zur Bereitstellung digitaler Qualitätsmerkmale wird erarbeitet. Kernbestandteil sind hier sog. CAD-Links, mit deren Hilfe in einem zentralen Qualitätsmerkmalbauteil die entsprechenden Informationen vereint werden können. Mithilfe einer Datenbank lassen sich wiederkehrende Qualitätsmerkmale schnell und einfach verwalten. Durch die Freigabe dieses Qualitätsmerkmalbauteils können auch am Entwicklungsprozess beteiligte Gewerke die Informationen nutzen.

**Frage Methode 1:** *Welche Methode ist notwendig, um eine Toleranzsimulationssoftware mit dem PDM-System sowie CAD-System zu koppeln?*

Zur Kopplung eines PDM- sowie CAD-Systems an ein Toleranzsimulationssystem ist es erforderlich, eine Schnittstelle zwischen den beiden Parteien zur Verfügung zu stellen. Dazu werden zunächst die Architekturen der beteiligten Systeme analysiert und dann ein entsprechender Algorithmus entwickelt, um das Zuordnen der Informationen vom einen in das andere System zu ermöglichen.

**Frage Methode 2:** *Welche Methode ist erforderlich, um einen automatisierten Aufbau eines Toleranzsimulationsmodells zu erzielen?*

Zum automatisierten Modellaufbau werden sämtliche Eingangsgrößen in ein Toleranzsimulationsmodell wie die CAD-Daten, Fügefolge, Bezugsstellen, Spann- und Fixierkonzept, Messschnitte sowie Messpunkte (samt Randbedingungen: LSL, USL) in einer digitalen Form benötigt. Mithilfe eines Algorithmus wird eine Reduzierung sowie Umstrukturierung dieser Eingangsgrößen durchgeführt, so dass diese in ein simulationsfähiges Datenformat überführt werden können. Einzig das zu messende Qualitätsmerkmal muss durch den Nutzer definiert werden.

**Frage Methode 3:** *Wie lässt sich ein Optimierungsprogrammsystem mit der Toleranzsimulationssoftware koppeln sodass die Eingangsdaten der Toleranzsimulation einer Optimierung unterzogen werden können?*

Das Optimierungsprogrammssystem wird durch entsprechende Skripte an die Toleranzsimulationssoftware gekoppelt. Grundsätzlich muss dazu die Möglichkeit eines skriptbasierten Aufrufs des Optimierungsworkflows gegeben sein. Zudem ist der Export von Designvarianten, die im Rahmen eines Design of Experiments berechnet werden, zu gewährleisten. Mithilfe dieser Varianten lassen sich anschließend die entsprechenden Varianten der Toleranzsimulationsmodelle aufbauen und berechnen. Das Einlesen dieser Simulationsergebnisse muss ebenfalls durch das Optimierungsprogrammssystem möglich sein. Basierend auf diesen Simulationsdurchläufen lässt sich dann das Metamodell berechnen, an dem Optimierungen durchführbar sind.

**Frage Prozess 1:** *Wie sollte das Toleranzmanagement im Unternehmen organisatorisch verankert sein, um gezielt Einfluss auf Produkt und Prozess nehmen zu können?*

Die Prozessstruktur wird so definiert, dass für präventives Toleranzmanagement ein zusätzlicher Meilenstein vor jeder Datenfreigabe erscheint. Dadurch können neu erarbeitete Konzepte frühzeitig mithilfe der Toleranzsimulation abgesichert und die entsprechenden Informationen fristgerecht zur Freigabe im Datensatz verankert werden. Hierdurch erlangen auch Neukonzepte früher den erforderlichen Reifegrad im Produktentwicklungsprozess.

**Frage Prozess 2:** *Welche Prozessstruktur wird für ein im Produktentwicklungsprozess und Produktionsentwicklungsprozess tief verankertes Toleranzmanagement benötigt und welche Meilensteine sind hierbei erforderlich?*

Zielkonzept einer organisatorischen Verankerung des Toleranzmanagements im Unternehmen sollte eine Matrixorganisation darstellen. Das Zusammengehörigkeitsgefühl für ein Produkt entsteht hier durch die vertikalen Spalte. Auch gibt es innerhalb dieses Konzepts einen klaren Repräsentanten, der in seiner Funktion als zentraler Ansprechpartner für das Produkt die Kommunikation mit anderen Fachbereichen vereinfacht. Durch horizontale Zeilen werden Querschnittsfunktionen des Produktportfolios ergänzt. Damit diffundieren konzeptgleiche Lösungsvarianten in alle Produkte.

**Frage Prozess 3:** *Welche prozessualen Schritte (Meilensteine) sind notwendig, um einer Inkonsistenz der Informationskette v. a. in Bezug auf die Produktionsplanung sowie die Qualitätssicherung / Messtechnik entgegenzuwirken?*

Es werden weitere prozessuale Schritte zu den einzelnen Freigaben im Produktentstehungsprozess definiert. Somit sind die digitale Fügefolge, das Spann- und

Fixierkonzept mit darin enthaltenen Metadaten sowie ein gewerkeübergreifend abgestimmtes Schnittmodell vor jeder Datenfreigabe (z. B. P-Freigabe, W-Freigabe, „\_“-Freigabe) zu archivieren. Dadurch können bis zum eigentlichen Freigabetermin mögliche Inkonsistenzen der Daten erkannt und gegebenenfalls behoben werden.

**Frage Prozess 4:** *Welche prozessualen Schritte (Meilensteine) sind notwendig, um die Inkonsistenz der Informationskette v. a. innerhalb des Toleranzmanagements zu schließen?*

Innerhalb des Toleranzmanagements werden Dokumente wie der Fugen- und Radienplan oder der Funktionsmaßkatalog erst nach der Freigabe erstellt. Durch den zusätzlichen Datenbereitstellungspunkt vor der Freigabe kann auch hier frühzeitig der Arbeitsstand der genannten Dokumente auf Unstimmigkeiten geprüft werden. Bis zum Freigabetermin liegen dann in sich konsistente Fugen- und Radienpläne sowie Funktionsmaßkataloge vor. Auch Arbeitsstände der Toleranzkonzepte können nach diesem Datenbereitstellungstermin auf Unstimmigkeiten hin geprüft und gegebenenfalls bis zum endgültigen Freigabetermin angepasst werden. Dies vermeidet zusätzliche Abstimm Schleifen vor der Freigabe sowie kosten- und zeitintensive Änderungen nach der Freigabe.

Zum Erzielen eines Forschungsfortschritts in den prozessualen Forschungsfragen werden die Beitragsleister Datengrundlage sowie verfügbares Freigabemanagement im PDM-System benannt. Zur Ermöglichung prozessualer Verbesserungen ist es nötig, einen reibungslosen Prozessdurchlauf zu gewährleisten. Dazu muss zum einen eine digitale Datenbasis (z. B. Metainformationen innerhalb der Daten) bestehen. Methoden, um dies zu ermöglichen, werden innerhalb der methodischen Forschungsfragen erarbeitet. Zum anderen ist ein Freigabemanagement erforderlich, um diese Daten den beteiligten Gewerken zu den im Prozess verankerten Meilensteinen zur Verfügung zu stellen. Diese Möglichkeit steht in modernen PDM-Systemen zur Verfügung.

**Frage System 1:** *Welche softwaretechnische Unterstützung ist notwendig, um einen automatisierten Toleranzsimulationsdurchlauf im laufenden Entwicklungsprozess ausführen zu können?*

Es wurde eine ideale Systemlandschaft zum automatisierten Toleranzsimulationsmodell aufbau definiert. Diese bietet eine Filterfunktion, um Daten entsprechend zu strukturieren. Des Weiteren erfolgte mithilfe einer eigens dafür entwickelten



Software (Tolerizer) die praktische Einbindung des erarbeiteten Konzepts in eine bestehende Systemlandschaft.

### 8.3 Fazit und Ausblick

Die Umsetzbarkeit der erarbeiteten Methoden sowie die softwaretechnische Lösung des Forschungsansatzes wurden in einer bestehenden Systemlandschaft gezeigt. Während der Ausarbeitung ergaben sich Potentiale für weitere Forschungsaktivitäten:

Der Ansatz beruht auf einer vollständig vorhandenen Datenbasis wie sie erst nach einem Datenfreigabemeilenstein vorliegt. Je später im Entwicklungsprozess Änderungen aufkommen, umso kostenintensiver lassen sich diese realisieren. Ziel einer möglichen Weiterentwicklung des Ansatzes wäre die Reduzierung der Eingangsgrößen. Dies führt zwar auf den ersten Blick zu einer weniger genauen Aussagefähigkeit über die Auswirkung der erforderlichen Anpassungen, kann aber beim genaueren Betrachten gerade in frühen Entwicklungsphase den Richtungsentscheid für oder gegen ein Konzept geben. Durch die im Rahmen der Arbeit entstandene Anbindung eines Optimierungsprogrammsystems eröffnet sich zudem die folgende Möglichkeit.

Es soll z. B. die Optimierung eines Anbindungskonzepts zweier Bauteile erfolgen, sodass das Minimum an Streuung von Fuge und Versatz zwischen den Bauteilen erreicht wird. Notwendige Eingangsgrößen für diese Optimierung sind die fugenbildenden Konturen der beiden Bauteile (Strak) sowie der Bauraum der möglichen Anbindung der Bauteile (Parameterraum). Des Weiteren sollte ein grobes Konzept der Mess- und Antaststrategie der Fuge und des Versatzes vorliegen. Mithilfe dieser Eingangsgrößen lässt sich durch ein Design of Experiments die im vorgegebenen Bauraum ideale Anbindung für die Bauteilpaarung berechnen. Abbildung 8.1 zeigt das Konzept der Optimierung von Anbindungskonzepten in frühen Entwicklungsphasen.

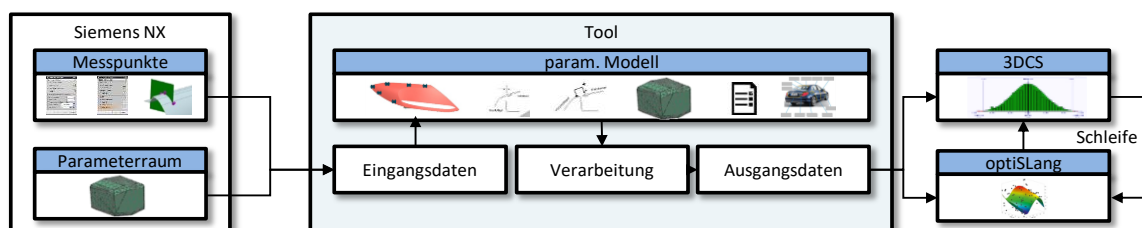


Abbildung 8.1 Optimierung von Anbindungskonzepten in frühen Entwicklungsphasen

Weitere Forschungsdesiderate liegen in der automatisierten Toleranzsimulationsmodellerstellung von statisch überbestimmten Bauteilen und Baugruppen. Dazu kann der in Kapitel 6.6.4 gezeigte Algorithmus zur Berechnung der Verbauoperationen erweitert werden. Auch die Methoden zum Aufbau von Karosserierohbau-Toleranzsimulationsmodellen kann auf statisch überbestimmte Systeme übertragen werden. Des Weiteren werden zum Aufbau von überbestimmten Toleranzsimulationsmodellen FE-Berechnungsdaten, wie Bauteilnetze und Steifigkeitsmatrizen, benötigt. Die Verfügbarkeit dieser Daten im Entwicklungsprozess müsste sichergestellt sein.

Der hier entwickelten Methoden bietet also die Grundlage für weitere Forschungsansätze, die trotz Kosten- und Zeitoptimierung der Qualitätssicherung dienen und damit einen unternehmerischen Vorteil mit sich bringen.



## Literaturverzeichnis

- [Abra, Schu] Abramovici, M., Schulte, S.; Benefits of PLM- Nutzenpotentiale des Product Lifecycle Management in der Automobilindustrie, IBM Verlag, Frankfurt, 2004
- [ARM] AMR Research Study PLM; Report of ARM Research Inc., Boston, 1999
- [Arsa] Arsanjani, A.; Service-oriented modeling and architecture - How to identify, specify, and realize services for your SOA, IBM developerWorks, 2004
- [Bless] Blessing, L.; DRM, a Design Research Metodology; 2009
- [Bohn, Hets] Bohn, M., Hetsch, K.; Toleranzmanagement im Automobilbau, 1. Auflage, Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2013
- [Bohn, Hets2] Bohn, M., Hetsch, K.; Funktionsorientiertes Toleranzdesign; Maßgeschneiderte Präzision im Maschinen-, Fahrzeug- und Gerätebau, 1. Auflage, Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2017
- [Bril] Brill, M.; Parametrische Konstruktion mit CATIA V5 - Methoden und Strategien für den Fahrzeugbau, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2009
- [Bron] Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A., Musiol, G., Mühling, H.; Taschenbuch der Mathematik, Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main, 2008]
- [Brow] Brown, A., W.; Model driven architecture: Principles and practice. Software and System Modeling, Springer Verlag, 2004
- [Buch, Baue, Reic] Buchwald, S., Bauer, T., Reichert, M.; Durchgängige Modellierung von Geschäftsprozessen in einer Service-orientierten Architektur, Modelling 10, Klagenfurt, 2010
- [Bung, Zimm, Buch, Pflü] Bungartz, H., Zimmer, S. Buchholz, M. Pflüger, D.; Modellbildung und Simulation - Eine anwendungsorientierte Einführung, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009
- [Burr, Muel] Burr, H., Müller, M., Vielhaber, M.; „EIMS - A Framework for Engineering Process Analysis“, proceedings of the International Conference on Engineering Design; ICED 07, Paris, 2007
- [Burr] Burr, H.; Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohbau, Dissertation, Universität des Saarlandes Schriftenreihe Produktionstechnik, 2008

- [Coop] Cooper, R.; Top oder Flop in der Produktentwicklung Erfolgsstrategien: Von der Idee zum Launch, 1. Auflage, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002
- [Daen] Daenzer, W. F., Huber, F.; Systems Engineering - Methoden und Praxis, Verlag Industrielle Organisation, Zürich, 1994
- [Dass] Dassault Systems; 3D Master whitepaper, Dassault Systems, 2013
- [Dass2] Dassault Systems; 3D Master - Drive accuracy into your business, Dassault Systems, Vélizy-Villacoublay Cedex, 2013
- [DCS] Dimensional Control Systems, Inc; Software Help Manual. Version 7.4; 1994-2016
- [DIN1101] Deutsches Institut für Normung; Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf, Beuth Verlag, 2017
- [DIN32937] Deutsches Institut für Normung; Mess- und Prüfmittelüberwachung - Planen, Verwalten und Einsetzen von Mess- und Prüfmitteln, Beuth Verlag, 2018
- [DIN45020] Deutsches Institut für Normung; Normung und damit Zusammenhängende Tätigkeiten - Allgemeine Begriffe, Beuth Verlag, 2006
- [DIN5459] Deutsches Institut für Normung; Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Bezüge und Bezugssysteme; Beuth Verlag, 2016
- [DIN6789-2] Deutsches Institut für Normung; Dokumentationssystematik; Dokumentensätze Technischer Produktdokumentationen, Beuth Verlag, 1990
- [DIN9000] Deutsches Institut für Normung; Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe, Beuth Verlag, 2015
- [Dyna] DYNARDO GmbH: optiSlang Grundlagen Workshop, Schulungsunterlagen, Sindelfingen, 2015
- [Ehre, Meer] Ehrenspiel, K., Meerkam, H.; Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit; Hanser Verlag, 2013
- [Ehre] Ehrenspiel, K.; Integrierte Produktentwicklung, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2009
- [Eign, Stel] Eigner, M., Stelzer, R.; Product Lifecycle Management, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009

- [Eiss] Eissrich, R.; Digitale Fabrik - Die integrierte und ganzheitliche  
Gewerkeplanung, Euroform Jahrestagung Digitale Fabrik, 2007
- [Fass] Fassi Fihri, N. Et al; Associative modeling of manufacturing information in  
CAD-Systems, Congress INGEGRAF-ADM\_AIP PRIMECA, Madrid, 2013
- [Ford] Ford, H.; Erfolg im Leben; Paul List Verlag, München 1952
- [Fors] Forster, E.; Digitale Fabrik - Integratoin der Geschäftspartner, Euroform  
Jahrestagung Digitale Fabrik, 2007
- [Geck] Geckler, D.; Konzernweite Einführung der Werkzeuge und Methoden der  
Digitalen Fabrik in der Volkswagen AG, Euroform Jahrestagung Digitale  
Fabrik, 2008
- [Gerd, Lemp] Gerdts, M., Lempio, F.; Mathematische Optimierungsverfahren des  
Operation Research, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin New York,  
2011
- [Gerd] Gerdts, M.; Optimierung, Skriptum, Universität der Bundeswehr München,  
Institut für Mathematik und Rechenanwendungen, 2015
- [Gerd2] Gerdts, M.; Einführung in die Optimierung, Skriptum, Universität der  
Bundeswehr München, Institut für Mathematik und Rechenanwendungen,  
2013
- [Günz] Günzel, U.; Das Mercedes-Benz Development System (MDS): MDS-  
Informationen für Einsteiger, Mercedes Benz unveröff, 2012
- [Hama] Hamann, M.; Seminar Metaheuristiken und Approximationsalgorithmen:  
Populationsbasierte Metaheuristiken: Grundlagen und  
Schwarmintelligenz, Karlsruher Institut für Technologie, Wissenschaftliche  
Publikation, Karlsruhe, 2012
- [Hirz, Diet, Gfre, Lang] Hirz, M., Dietrich, W., Gfrerrer, A., Lang, J.; Integrated Computer-Aided  
Design in Automotive Development. Development Processes, Geometric  
Fundamentals, Methods of CAD, Knowledge-Based Engineering Data  
Management, Springer-Verlag, 2013
- [Homb] Homburg, C.; Marketing Management Strategie - Instrumente -  
Umsetzung - Unternehmensführung; Gabler Verlag, 2016
- [Iann, Sand] Iannuzzi, MP, Sandgren, E.; Tolerance optimization using genetic  
algorithms: Benchmarking with manual analysis, 4th CIRP Computer-Aided  
Tolerancing, 1995
- [Jean, Chan] Jeang, A., Chang, C.-L.; Concurrent Optimization of Parameter and  
Tolerance Design via Computer Simulation and Statistical Method,  
Springer-Verlag, Journal of advanced manufacturing technology, London  
2002

- [Jean, Chan2] Jeang, A., Chang, C.-L.; Combined Robust Parameter and Tolerance Design Using Orthogonal Arrays, Springer-Verlag, Journal of advanced manufacturing technology, London, 2002
- [Kall1] Kallenbach, E., Birli, O., Saffert, E., Schäffle, C.; Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte, VDI-Berichte 1315, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- [Kall2] Kallenbach, E., Zöppig, V., Birli, O., Feindt, F., Ströhla, T., Saffert, E., Schmidt, J.; Integration mechatronischer Systeme, VDI-Mechatronik Tagung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001
- [Kana] Kanai, S. Et al; Optimal tolerance synthesis by genetic algorithm under the machining and assembly constraints, 4th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 1995
- [Katz1] Katzenbach, A.; Engineering IT heute - Wege in die Zukunft, Vortrag AK-SWT Konstanz, Konstanz,
- [Katz2] Katzenbach, A.; Informationstechnik und Wissensverarbeitung in der Produktentwicklung, Skriptum, IKTD, Stuttgart 2012
- [Kim, Cho] Kim, J. K., Cho, R. C.; The use of response surface designs in the selection of optimum tolerance allocation, Quality Engineering, 2000
- [Kits, Hasl] Kitsios, V., Haslauer, R.; 3D-Master: Zeichnungslose Produktbeschreibung mit CATIA V5, Springer Verlag, 2014
- [Klei1] Klein, B.; Toleranzmanagement im Maschinen und Fahrzeugbau. Form und Lagetoleranzen - Tolerierungsprinzipien - Tolerierungsverknüpfungen - Maßketten - Oberflächen, 1. Auflage, Oldenburg Verlag, München, Wien, 2006
- [Klei2] Klein, B.; Prozessorientierte Statistische Tolerierung - Mathematische Grundlagen - Toleranzverknüpfungen - Prozesskontrolle - Maßkettenrechnung - Praktische Anwendung. Band 73, Expert Verlag, Renningen, 2007
- [Kühn] Kühn, W.; Digitale Fabrik - Fabriksimulation für Produktionsplaner, Carl-Hanser Verlag, Wien/München, 2006
- [Lee] Lee, J Et al; Optimal tolerance allotment using a genetic algorithm and truncated Monte Carlo simulation, Computer Aided Design, 1995
- [Lepa] Lepadatu, D Et al; Springback of Stamping Process Optimization Using Response Surface Methodology and Interval Computation, Quality Technology & Quantitative Management, 2009

- [Lind] Lindemann, U.; Methodische Entwicklung technischer Produkte Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, 2. Auflage, VDI-Buch Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009
- [Littg] Littger, K.; Optimierung, Eine Einführung in rechnergestützte Methoden und Anwendungen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1992
- [Litw1] Litwa, F.; Ausarbeitung eines Konzepts zur automatisierten Erstellung von Toleranzsimulationsmodellen für den Bereich Karosserierohbau-entwicklung aus vorhandenen Prozessdaten, Masterarbeit am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Erlangen, 2013
- [Litw2] Litwa, F.; Virtuelle Produktentwicklung im Automobilbau - Fokus Toleranzmanagement, Digitale Fabrik, Vorlesung Saarbrücken, 2015
- [Litw3] Litwa, F. Et al; Approach for a standardized database regarding tolerance analysis in automotive industry, NordDesign Conference, Espoo, 2014
- [Litw4] Litwa, F. Et al; Automated point-based tolerance analysis model creation for sheet metal parts, 13<sup>th</sup> CIRP conference on Computer Aided Tolerancing, 2014
- [Litw5] Litwa, F. Et al; Optimization coupling approach for/with non-static point based CAT-models, 14<sup>th</sup> CIRP conference on Computer Aided Tolerancing, 2016
- [Litw6] Litwa, F. Et al; Sensitivity analysis of several Body-in-White single part and assembly parameters using tolerance analysis, Weimarer Optimierungs und Stochastik Tagung, Weimar, 2015
- [Litw7] Litwa, F. Et al; Sensitivity analysis of several body-in-white parameters using tolerance analysis, Dynardo GmbH RDO-Journal Issue 1/2016, 2016
- [Litw8] Litwa, F. Et al; Determination of functional intersections between multiple tolerance-chains by the use of the assembly graph, NAFEMS World Congress 2015, San Diego, 2015
- [Liu, Hu] Liu, C., Hu, J.; Variation Simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997
- [Löof, Herm, Söde] Löof, J., Hermansson, T., Söderberg, R.; An Efficient Solution to the Discrete Least-Cost Tolerance Allocation Problem With General Loss Functions, 9th CIRP Computer Aided Tolerancing, 2005
- [Lossn] Lossnitzer, E.; Dimensional Engineering - ATOL Arbeitsgemeinschaft Toleranzmanagement, General Motors, 2014
- [Luna] Lunau, S. Et al; Design for Six Sigma +Lean Toolset - Innovationen erfolgreich realisieren, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007



- [Mane] Manewitz, F.; Toleranzanalysen an beliebigen physikalischen Systemen, Vieweg Verlag, ATZ10/05, Wiesbaden, 2005
- [MBN10273] Mercedes Benz Norm; Zusammenbauten im Karosserierohbau - Allgemeinetoleranzen, interne Werksnorm, Daimler AG, 2009
- [MBN11011] Mercedes Benz Norm; Geometrische Produktspezifikation - Geometrische Bemaßung und Tolerierung (GD&T), interne Werksnorm, Daimler AG, 2010
- [MBN36012] Mercedes Benz Norm; Pressteile aus Metall bis 3mm Blechdicke; Allgemeinetoleranzen, interne Werksnorm, Daimler AG, 2013
- [Moro] Moroni, G. et al; Robust design of fixture configurations, 24th CIRP Design Conference, 2014
- [Neck, Wint, Viel] Neckenich, J., Winter, R., Vielhaber, M.; Digital Support of Wiring Harness Development (based on the 3D Master Method), Proceeding of the 20<sup>th</sup> International Conference of Engineering Design, Vol. 10, Mailand, 2015
- [OMG] OMG; OMG Unified Modeling Language (OML UML), Superstructure, 2009
- [Ovtc] Ovtcharova, J.; Vorlesung "Virtual Engineering", IMI Universität Karlsruhe, 2007
- [Paff] Paffenholz, A.; Die Produktentstehung als durchgängiger e3D-Prozess, Sierke Verlag, Göttingen, 2009
- [Pahl, Beitz] Pahl, G., Beitz, W.; Konstruktionslehre: Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung, Springer Verlag, 2013
- [Park] Parkinson, D.B.; The Application of a Robust Design Method to Tolerancing, Journal of Mechanical design Vol 122, 2000
- [Pors] Porsche Engineering; Fachvortrag Toleranzmanagement, Universität Stuttgart, 2014
- [Räse] Räse, U.; Nachhaltige Produktentwicklung bei Mercedes-Benz-Werkzeuge zum Controlling on Projektfortschritt und Produktreifegrad, DFX Symposium, Hamburg, 2010
- [Reit] Reiter, R.; Digitale Fabrik - Erfahrungen aus dem produktiven Einsatz virtueller Methoden, Kongress Digitale Fabrik, Ludwigsburg, 2004
- [Reus] Reuschle, M.; Das Daimler Startmodell für NX, Mercedes-Benz Unveröff. 2012
- [Rich] Rich, A.; Allgemeine Spezifikation für Karosserieteile, Mercedes Benz, Unveröff., 2011

- [Rose] Rosenqvist, M. et al; Geometrical robustness analysis considering manual assembly complexity, 5<sup>th</sup> CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, 2014
- [Saue] Sauer, O.; Trends bei Manufacturing Execution Systemen (MES) am Beispiel der Automobilindustrie, PPS Management 10, No. 3, 2005
- [Schi] Schittkowski, K.; NLPQL: A Fortran subroutine for solving constrained non-linear programming problems, Annual of Operations Research 5, 1986
- [Schm, Lüde] Schmidt, N., Lüder, A.; AutomationML in a Nutshell, AutomationML.org, 2015
- [Schm] Schmitzl, J.; Durchgängige Modellierung von prozessorientierten Anwendungen mit BPMN 2.0, Masterarbeit am Institut für Datenbanken und Informationssysteme, Ulm, 2010
- [Schu, Stöl, Stra] Schuh, G., Stölzle, W., Straube, F.; Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008
- [Schub] Schubert, K.; Handwörterbuch des ökonomischen Systems der Bundesrepublik Deutschland, VS-Verlag für Sozialwissenschaften/GWV-Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2005
- [Schu] Schumacher, A.; Optimierung mechanischer Strukturen: Grundlagen und industrielle Anwendungen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013
- [Siva] Sivakumar, K. Et al; Evolutionary sensitivity-based conceptual design and tolerance allocation for mechanical assemblies, International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2010
- [Sode, Lind] Soderberg, R., Lindkvist, L.; Computer aided assembly robustness Evaluation, Journal of Engineering Design, 10
- [Spat, Leut] Spath, D., Leutes, J.; Wirtschaftlich Entwickeln und Produzieren durch die digitale Produktion, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) Vol 103, No. 6, 2008
- [Stei, Bohn] Steinle P., Bohn M.; An approach of design methodology and tolerance optimization in the early development stage to achieve robust systems, Applied Mechanics and Materials Volume 104, 2011
- [Stoc] Stockinger A.; Computer Aided Robust Design - Verknüpfung rechnergestützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements, Dissertation, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik Universität Erlangen - Nürnberg, 2011
- [Teck] Tecklenburg, G.; Die digitale Produktentwicklung, Parametrisch assoziative Entwicklung von Baugruppen der Fahrzeugkarosserie: Visionen und

- Erfahrungen für zukünftige Entwicklungsprozesse, expert Verlag, Aachen, 2007
- [Vajn, Webe] Vajna, S., Weber, C., Zeman, K., Hehenberger, P., Gerhard, D., Wartzack, S.; CAx für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung, Springer Verlag, 2018
- [VDA4] VDA Band 4; Wirtschaftlicher Tolerierungsprozess, 1. Auflage, 2008
- [VDI2206] VDI-Richtlinie; Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, Beuth-Verlag, 2004
- [VDI2221] VDI-Richtlinie; Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Beuth-Verlag, 1993
- [VDI2222] VDI-Richtlinie; Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, Beuth-Verlag, 1997
- [VDI2223] VDI-Richtlinie; Methodisches Entwerfen technischer Produkte, Beuth-Verlag, 2004
- [VDI2243] VDI-Richtlinie; Recyclingorientierte Produktentwicklung, Beuth-Verlag, 2002
- [VDI2247] VDI-Richtlinie; Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung, Beuth-Verlag, 1994
- [VDI4499] VDI-Richtlinie; Digitale Fabrik, Beuth-Verlag, 2008
- [VSA] Variation Analysis System; Help Manual, Teamcenter 9.1, 2011
- [Wall, Frei, Olsc] Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., Olschewski, I; Strategien in der Automobilindustrie - Technologie und Marktentwicklungen, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [Walt1] Walter, M. et al; Toleranz-Kosten-Optimierung bewegter Systeme mittels Partikelschwarm-Optimierung, DfX Symposium, 2014
- [Walt2] Walter, M. et al; Least Cost Tolerance Allocation for Systems with time-variant Deviations, 13th CIPR conference on Computer Aided Tolerancing
- [Walt3] Walter, M.; Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungs-behafteter Mechanismen, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1 Nr. 437, Düsseldorf, 2016
- [Wang, Dong, Aitc] Wang, G., Dong, Z., Aitchison, P.; Adaptive Respond Surface Model - A Global Optimization Scheme for Approximation-based Design Problems, Engineering Optimization Vol. 33, 2001

- [Weck] Weckenmann, A.; Fertigungsmesstechnik - Modellgestützte Prüftechnik zur Produktverifikation Messtechnik, Skriptum, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik, Erlangen, 2013
- [Wede] Wedeniwski, S; Mobilitätsrevolution in der Automobilindustrie, Springer Verlag, Heidelberg, 2015
- [Willi, Wu] William, L., Wu, C.F.J.; An integrated method of parameter design and tolerance design, Quality Engineering, 1999
- [Wu, Dant, Etie, Siad, Mart] Wu, F., Dantan, J.Y., Etienne, A., Siadat, A., Martin, P.; Improved algorithm for tolerance allocation based on Monte Carlo simulation and discrete optimization, Computers & Industrial Engineering, 2009
- [www01] [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2017/2017\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2017/2017_node.html) , Homepage des Kraftfahrbundesamts, Stand: 23.05.2018
- [www02] <http://www.duden.de/>, Homepage des Duden, Stand: 23.05.2018
- [www03] <http://www.solid-system-team.de/pdm/smap3d-pdm/pdm-definition.html>, Solid System Team Seite, Stand: 23.05.2018
- [www04] <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/modell-driven-architecture-MDA.html>, IT-Wissen Homepage, Stand: 23.05.2018
- [www05] <http://www.dassaultfalcon.com>, Dassault Systems, Dassault Falcon Homepage, Stand 23.05.2018
- [www06] <http://www.automationml.org>, AutomationML - Fachexperten erklären das Format, Stand 23.05.2018
- [www07] <http://www.duden.de/rechtschreibung/Optimum>, Homepage des Duden, Stand 23.05.2018
- [www08] <http://www.json.org/json-de.html> , Einführung in JSON, Stand 23.05.2018
- [www09] <http://www.yaml.org/spec/1.2/spec.html#Intruduction>, YAML Ain't Markup Language, Version 1.2, Stand 23.05.2018
- [www10] <http://www.edition-w3.de/TR/2004/REC-xml11-20040204/>, Extensible Markup Language (XML) 1.1, Stand 23.05.2018
- [www11] <https://msdn.microsoft.com/de-de/library/dd409437.aspx> UML Class Diagram :Reference Microsoft, Stand 23.05.2018
- [www12] <https://www.daimler.com/nachhaltigkeit/produktion/elektro-offensive-in-der-pkw-produktion.html> Elektro offensive in der PKW-Produktion, Daimler AG, Stand 23.05.2018
- [www13] <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Entwicklung-und-Produktion-Digitale-Welten-in-realen-Fahrzeugen.xhtml?oid=9903854>

- Entwicklung und Produktion; Digitale Welten in realen Fahrzeugen, Daimler AG, Stand 23.05.2018
- [www14] <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Mercedes-Benz-startet-Kommunikationsoffensive-Das-Beste-oder-nichts.xhtml?oid=9907951>  
Mercedes-Benz startet Kommunikations-offensive: Das Beste oder nichts, Daimler AG, Stand 23.05.2018
- [Zhan] Zhang, C. et al; Statistical tolerance synthesis using distribution function zones, International Journal Production Research, 1999
- [Zhou, Vive, Mont, Morg] Zhou Y., Vivek T., Monteverde V., Morgan E.: Feature-based and Point-based Variation Modeling. Dimensional Control Systems, Inc. 2013



## A. Anhang

Anhang 1

Bedürfnisse	Zeitaufwand	Rechtmanagement	Standardisierung	Visualisierung ohne CAD-System	Datenreduzierung für Vergabeumfang	Maschinelle Toleranzauswertung	Prozesssicherheit	Simultanes Arbeiten	Datenperformance	Summe relativ	Relative Gewichtung [%]	Ranking
	1,00	3,00	5,00	3,00	7,00	0,20	3,00	7,00	1,00	1,70	18,86	8
<b>Zeitaufwand</b>	0,12	0,41	0,22	0,13	0,22	0,04	0,17	0,19	0,21			
	0,33	1,00	7,00	3,00	5,00	1,00	2,00	5,00	1,00	1,41	15,72	6
<b>Rechtmanagement</b>	0,04	0,14	0,30	0,13	0,16	0,19	0,11	0,14	0,21			
	0,20	0,14	1,00	1,00	2,00	1,00	3,00	3,00	0,14	0,67	7,40	3
<b>Standardisierung</b>	0,02	0,02	0,04	0,04	0,06	0,19	0,17	0,08	0,03			
	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	0,20	0,50	1,00	0,14	0,33	3,62	1
<b>Visualisierung ohne CAD-System</b>	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,28	3,13	1
	0,14	0,20	0,50	1,00	1,00	0,20	0,33	2,00	0,14			
<b>Datenreduzierung für Vergabeumfang</b>	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03	0,04	0,02	0,06	0,03			
	5,00	1,00	1,00	5,00	5,00	1,00	3,00	5,00	1,00	1,84	20,50	8
<b>Maschinelle Toleranzauswertung</b>	0,59	0,14	0,04	0,21	0,16	0,19	0,17	0,14	0,21			
	0,33	0,50	0,33	2,00	3,00	0,33	1,00	5,00	0,20	0,60	6,68	3
<b>Prozesssicherheit</b>	0,04	0,07	0,01	0,08	0,10	0,06	0,06	0,14	0,04			
	0,14	0,20	0,33	1,00	0,50	0,20	0,20	1,00	0,14	0,22	2,48	1
<b>Simultanes Arbeiten</b>	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,04	0,01	0,03	0,03			
	1,00	1,00	7,00	7,00	7,00	1,00	5,00	7,00	1,00	1,95	21,62	9
<b>Datenperformance</b>	0,12	0,14	0,30	0,29	0,22	0,19	0,28	0,19	0,21			

1	gleich wichtig	
3	etwas wichtiger	etwas weniger wichtiger
5	wichtiger	weniger wichtiger
7	viel wichtiger	viel weniger wichtiger
9	extrem viel wichtiger	extrem weniger wichtiger

Tabelle A1 AHP-Kontingenztabelle zur Anforderungsbewertung



