

Lehrstuhl für Produktentwicklung
der Technischen Universität München

Matrix-basierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und numerischer Simulation

Ulrich Herfeld

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ. Prof. Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann

Die Dissertation wurde am 11.01.2007 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen
am 17.04.2007 angenommen.

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Problemstellung

Zeit- und Kostendruck führen zu einer wachsenden Bedeutung der virtuellen Produktentwicklung. Durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind in den vergangenen Jahren sehr leistungsfähige Hard- und Softwaresysteme für die verschiedensten CAx-Anwendungen entstanden. Gleichwohl weisen die Systeme und Prozesse untereinander einen geringen Vernetzungsgrad auf. Wichtig ist diese Vernetzung in vielen Industriesegmenten für Konstruktion und numerische Simulation, da beide wesentlich zur konzeptionellen Gestaltung des Produktes beitragen und somit bestimmend für die Eigenschaften und Funktionen sind.

Die Integration der Einzelprozesse für Produkte hoher Komplexität ist nach wie vor noch nicht genügend entwickelt, hier wurden durch die starke Konzentration auf die IT-Lösungen wichtige Dimensionen der CAx-Integration vernachlässigt. Dabei sind der Effizienzsteigerung durch die alleinige Weiterentwicklung von Softwarelösungen Grenzen gesetzt. Große Potenziale liegen in einem ganzheitlichen Ansatz, der die Vielschichtigkeit der Integration berücksichtigt. In Industrie und Forschung werden aber diese Aspekte bisher nicht ausreichend berücksichtigt. Zentrales Problem bleibt die unterschiedliche Sicht auf das Produkt von Konstruktion und Simulation, die geometriebezogene und die funktionale Sicht. Diese müssen stärker vernetzt werden, um eine echte Integration der beiden Prozesse zu erreichen.

Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es, die verschiedenen Dimensionen der Integration von Konstruktion und Simulation aufzuzeigen und das Forschungsfeld der CAx-Integration somit deutlich zu erweitern. Die unterschiedlichen Sichten und Strukturierungen des Produktes von Konstruktion und Simulation sollen vernetzt werden. Daraus wird ein Ansatz entwickelt, wie eine Integration für komplexe Produkte aussehen kann, um einen effizienteren und gezielteren Informationsaustausch zu gewährleisten.

Ergebnisse

Die Arbeit weist zwei zentrale Ergebnisse aus: zum einen das „Modell der fünf Dimensionen der CAD-CAE-Integration“ und zum anderen die „Verknüpfung von Komponenten und Funktionen bzw. Eigenschaften“.

Ersteres resultiert aus Analysen des Standes der Forschung und Technik, die ein breites Spektrum an Integrationsansätzen für spezifische Problemstellungen bieten, jedoch keinen Allgemeingültigkeitscharakter erreichen. Entscheidend für wissenschaftliche Ansätze aus der Entwicklungsmethodik ist die Umsetzung und Anwendbarkeit in der industriellen Praxis. Daher wurden in der Analyse das Problemverständnis und das Dimensionenmodell auf den Erkenntnissen aus Anwenderbefragungen aus der Konstruktion und Simulation aufgebaut, die in Industrieunternehmen mit Produkten hoher Komplexität durchgeführt wurden. Resultat ist das

Modell der fünf Dimensionen der Integration von Konstruktion und Simulation: Prozess, Werkzeuge, Daten, Mensch und Produkt.

Die Verknüpfung der geometrie- und der funktionsbezogenen Produktsichten wird über eine Verknüpfungsmatrix realisiert. In der daraus entstandenen so genannten Bauteil-Lastfall-Matrix werden die Strukturen von Produkt und Funktionen bzw. Eigenschaften aufgelöst und neu geordnet. Die Bauteil-Lastfall-Matrix findet ihre Anwendung schließlich in der Restrukturierung von funktionsbezogenen Arbeitsteams, in dem Transfer von spezifischen Daten und Informationen zwischen Konstruktion und Simulation und in dem effizienten Aufbau von Simulationsmodellen.

Folgerungen für die industrielle Praxis

Strukturen und Methoden der virtuellen Entwicklung sind in der Industrie ein wichtiger Wettbewerbsfaktor geworden. Um diese weiterzuentwickeln, zu implementieren und die gewünschten Effizienzsteigerungen im industriellen Umfeld zu erreichen sind breitere Ansätze notwendig, die die fünf Dimensionen der Integration von Konstruktion und Simulation berücksichtigen. Der Methodenentwickler in der Industrie kann auf diesem Ansatz und auf dem Problemverständnis der CAx-Integration aufbauen.

Durch die Verknüpfung von Komponenten und Funktionen wird ein neuer Weg für komplexe Produkte beschritten, der die beiden Sichten von Konstruktion und Simulation früh im Entwicklungsprozess vernetzt. Das Werkzeug der Bauteil-Lastfall-Matrix bietet bereits jetzt durch diese Verknüpfung erste und vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der industriellen Praxis, die teilweise bereits in Pilotanwendungen realisiert werden. Für Konstrukteure und Berechner stellt diese Verknüpfung eine Plattform für die Kommunikation dar, die einen effizienten und zielgerichteten Austausch von geometrie- und berechnungsrelevanten Daten und Informationen ermöglicht.

Folgerungen für Forschung und Wissenschaft

Eine Konsequenz der Analysen und Ergebnisse der Arbeit ist die Erweiterung des Forschungsfeldes der CAx-Integration. Wurden bislang eher die Verbesserung der CAx- und Datenmanagement-Systeme ins Zentrum der Forschung gestellt, so rücken zunehmend die Dimensionen Prozess, Mensch und Produkt in den Fokus, um eine ganzheitliche Integration zu erzielen. Großes Potential für die Forschung liegt in der Weiterentwicklung von Verknüpfungsmethoden zwischen Elementen in allen fünf Dimensionen, denn nur so lassen sich die Komplexität moderner Produkte beherrschen und Prozesse effizient gestalten.

Garching, im Mai 2007

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München von September 2003 bis Dezember 2006.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Professor Dr.-Ing. Udo Lindemann, der mich durch sein Vertrauen und durch seine Unterstützung gestärkt und diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht hat. Ich habe viel bei ihm gelernt und die Zeit am Lehrstuhl trotz hoher persönlicher Belastung stets als große Bereicherung empfunden. Ich danke Professor Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann als Zweitberichterstatter und Professor Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ermöglicht haben mir diese Arbeit meine damaligen Vorgesetzten bei der Audi AG, Hr. Henning Adickes, Hr. Gerd Soder, Hr. Manfred Rotte und Dr.-Ing. Ulrich Hackenberg. Bei Ihnen möchte ich mich besonders für das in mich gesetzte Vertrauen und die Förderung herzlich bedanken. Großer Dank gebührt auch Dr.-Ing. Ulrich Knaust, der das Projekt zur CAD-CAE-Integration mit initiiert hat, das dieser Arbeit zugrunde liegt, und ein stets zuverlässiger Projektpartner und wertvoller Ideengeber war.

Ohne die Unterstützung, den Ratschlag und die Motivation meiner Lehrstuhl-Kollegen und Freunde Matthias Kreimeyer und Frank Deubzer wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Aus der gemeinsamen Arbeit und den intensiven wissenschaftlichen und fachlichen Diskussionen ist Freundschaft geworden.

Mein Dank gilt den Studenten, die mich mit Ihren Semester- und Diplomarbeiten sowie als studentische Hilfskräfte unterstützt haben: Hrn. Thomas Lorenzer, David Flores-Usbeck, Marco Iredi, Cyrille Dequidt, Dominik Löw, Stefan-Daniel Fuchs, Laurent Malherbe, Matthias Rucker und nicht zuletzt Tobias Frank, der sich bei den Abbildungen und der Literaturrecherche unentbehrlich gemacht hat.

Für die herzliche Aufnahme und Akzeptanz am Lehrstuhl als externer wissenschaftlicher Mitarbeiter möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls bedanken, allen voran sind hier Maik Maurer, Dr.-Ing. Thomas Braun, Dr.-Ing. Thomas Hessling, Luc Felgen und Christoph Baumberger zu nennen.

An dieser Stelle möchte ich an meinen verstorbenen Onkel Dr.-Ing. Michael Busch erinnern, der mich durch seine Fürsorge, seine Hilfe und sein Vertrauen früh gestärkt hat und den Grundstein für meinen von ihm leider nicht mehr erlebten späteren Werdegang gelegt hat.

Für die zurückliegenden drei Jahre der Anstrengungen und Entbehnungen danke ich meiner Familie, meiner Frau Kathrin und meinen Kindern Ferdinand und Konstantin, denen ich diese Arbeit widme. Ohne den Verzicht, das Verständnis und die permanente Unterstützung meiner Familie wäre die Arbeit nicht vollendet worden.

Gaimersheim, im Mai 2007

Ulrich Herfeld

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
1.1 Thematik der Arbeit	4
1.1.1 Begriffsdefinition und Systemgrenze der Arbeit	4
1.1.2 Ausgangssituation	7
1.1.3 Problemstellung der Arbeit	9
1.2 Zielsetzung der Arbeit	10
1.3 Erfahrungsgrundlage der Arbeit und wissenschaftlicher Ansatz	12
1.4 Aufbau der Arbeit	13
2. Grundlagen zur Integration von Konstruktion und Simulation	15
2.1 Produktbeispiel PKW-Karosserieentwicklung	16
2.1.1 Merkmale der PKW-Karosserie	16
2.1.2 Charakteristika des Karosserieentwicklungsprozesses	18
2.2 Virtuelle Produktentwicklung	22
2.2.1 Rechnerunterstützte Konstruktion	22
2.2.2 Simulationsverfahren im Produktentwicklungsprozess	26
2.2.3 Grundlagen zur Speicherung, Verwaltung und Austausch von Daten	31
2.3 Stand der Forschung und Technik zur Integration von Konstruktion und Simulation in der Produktentwicklung	37
2.3.1 Prozessanalyse zwischen Konstruktion und Simulation	37
2.3.2 CAD- und CAE-Systeme im Karosserie-Entwicklungsprozess	48
2.3.3 Datenmanagement und Schnittstellen im CAD-CAE-Prozess	52
2.3.4 Sequentielle und kontinuierliche bidirektionale Integration	55
2.3.5 Kopplung von CAD- und CAE-Systemen	57
2.3.6 Integrierende Systeme	64
2.3.7 Wissensbasierte Systeme	68
2.3.8 Weitergehende Forschungs- und Lösungsansätze	69
2.4 Transfer von Forschungsergebnissen in die industrielle Praxis	73

2.5	Zusammenfassung Kapitel 2	74
3.	Ansätze zur ganzheitlichen Integration von Konstruktion und Simulation	75
3.1	Ergebnisse von Anwenderbefragungen	75
3.1.1	Fragebogen zur Zusammenarbeit von Konstruktion und Simulation	75
3.1.2	Studie zur Kommunikation zwischen Konstruktion und Simulation	89
3.2	Problemdimensionen der Integration von Konstruktion und Simulation	91
3.2.1	Einführung der Dimensionen der Integration	92
3.2.2	Einordnung des Standes der Forschung in die Dimensionen der Integration	94
3.2.3	Entwicklung eines Problemsystems	95
3.3	Zusammenfassung Kapitel 3	104
4.	Kommunikation im Konstruktions- und Simulationsprozess	105
4.1	Definition und Bedeutung der effizienten Kommunikation in der Produktentwicklung	105
4.1.1	Klassifikation von Kommunikation, Information und Daten	105
4.1.2	Technische Unterstützung der Kommunikation in der Produktentwicklung	110
4.1.3	Definition der effizienten Kommunikation	111
4.1.4	Schlussfolgerungen für die Kommunikation zwischen Konstruktion und Simulation	111
4.2	Analyse der Kommunikation in komplexen Strukturen	112
4.2.1	Faktoren der Kommunikation in komplexen Strukturen	112
4.2.2	Folgerungen für den Kommunikationsprozess zwischen Konstruktion und Simulation	113
4.3	Informationsflüsse und -verarbeitung in der Konstruktion und Simulation	114
4.3.1	Inhalt und Art der übertragenen Daten und Informationen	116
4.3.2	Informationsfluss- und -verarbeitungsprozess	117
4.3.3	Definition von Informationsbausteinen	118
4.4	Zusammenfassung Kapitel 4	124
5.	Verknüpfung von Komponenten und funktionalen Eigenschaften	127
5.1	Strukturierung von Produkten, Funktionen und funktionalen Eigenschaften	127
5.1.1	Produktkomplexität und systematische Strukturierung	128
5.1.2	Modellierung von Produktstrukturen	133

5.1.3	Funktions- und Eigenschaftsstruktur eines Produktes	135
5.1.4	Verknüpfung von Produkt, Funktionen und funktionalen Eigenschaften	139
5.2	Die Einflussmatrix	141
5.2.1	Die Systematik der Einflussmatrix	142
5.2.2	Anwendungen der Einflussmatrix	144
5.3	Verknüpfung von Komponenten mit funktionalen Eigenschaften	145
5.3.1	Sammlung der benötigten Daten	147
5.3.2	Umsetzung in der Bauteil-Lastfall-Matrix	149
5.4	Zusammenfassung Kapitel 5	152
6.	Anwendungen und Weiterentwicklungen der Bauteil-Lastfall-Matrix	154
6.1	Die Bauteil-Lastfall-Matrix als Kommunikationsunterstützung im funktions- und eigenschaftsorientierten Entwicklungsprozess	154
6.1.1	Eigenschaftsorientierte Teams in der Produktentwicklung	155
6.1.2	Methodik der Teambzusammenstellung für die Konstruktion und Simulation	156
6.2	Die Bauteil-Lastfall-Matrix zur gezielten Filterung von Informationen	159
6.2.1	Theoretisches Konzept	159
6.2.2	Informationsbausteine in der Bauteil-Lastfall-Matrix	160
6.2.3	Ausblick auf die Umsetzung	162
6.3	Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Bauteil-Lastfall-Matrix	163
6.3.1	Erweiterung der Matrix auf Subsystemebene	164
6.3.2	Unterstützung im Modellaufbau der numerischen Simulation	165
6.3.3	Dynamisierung	168
6.4	Kritische Bewertung und Reflexion der Bauteil-Lastfall-Matrix	169
6.5	Zusammenfassung Kapitel 6	171
7.	Zusammenfassung und Ausblick	173
7.1	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	173
7.2	Ausblick auf zukünftige Herausforderungen in der CAD-CAE-Integration	175
8.	Verzeichnisse	177
8.1	Glossar	177
8.2	Literaturverzeichnis	182

9. Anhang	209
9.1 Fragebogen zur Anwenderbefragung in der Konstruktion und Simulation	209
9.2 Auszüge aus der Bauteil-Lastfall-Matrix	217
10. Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung	219

1. Einleitung

Die virtuelle Produktentwicklung¹ hat sich mit der steigenden Rechnerleistung und dem gestiegenen Kostenbewusstsein in der Industrie eine zentrale Rolle im Produktenstehungsprozess geschaffen. Den Wandel in der Produktentwicklung von der werkstatorientierten Konstruktion über Zwischenstufen zur virtuellen Produktentwicklung zeigt folgendes Diagramm von SPUR & KRAUSE [1997] in Abbildung 1-1:

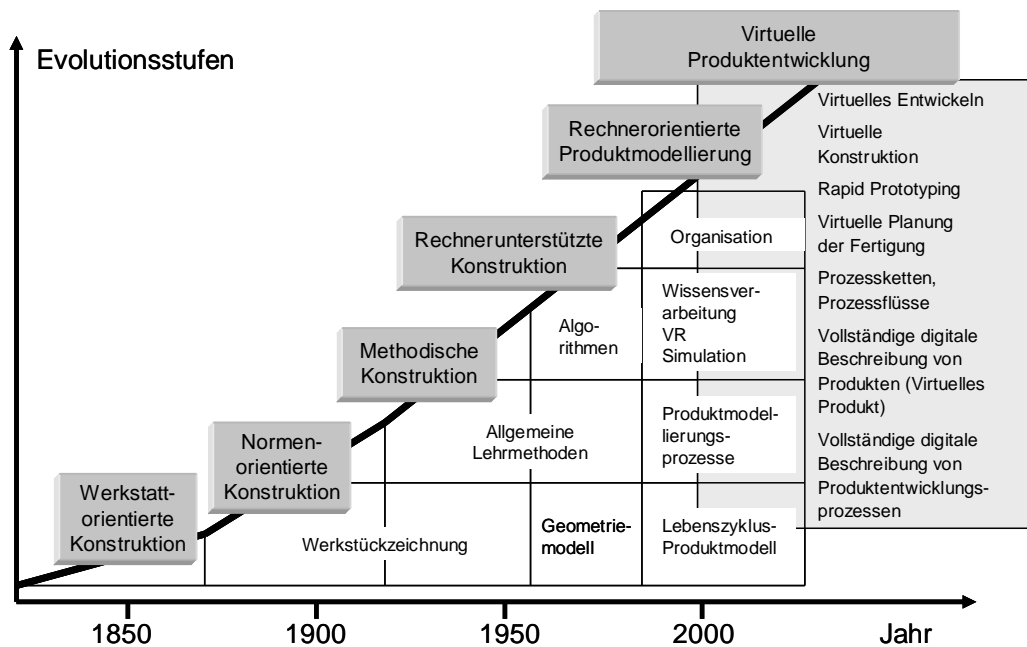


Abbildung 1-1: Evolutionsphasen des Konstruierens [NACH SPUR & KRAUSE 1997]

Die Produkte und Entwicklungsprozesse sind durch die leistungsfähigen Rechnersysteme immer komplexer geworden und haben sich in vielfältiger Weise verändert. Nach GÜNZLER [2005] resultiert die Komplexität aus dem zunehmenden globalen Wettbewerbsdruck, der einen immer höheren technischen Anspruch an die Funktionsweise der Produkte stellt, ohne dabei aber Abstriche in der Qualität in Kauf zu nehmen. Dazu kommt aber auch eine dramati-

¹ Unter einem virtuellen Produkt versteht man ein nur in der Möglichkeit vorhandenes Produktmodell, das aber durch Eigenschaften gekennzeichnet ist, die dem wirklichen Verhalten entsprechen. Somit ist die Entwicklung eines virtuellen Produkts auf die Entwicklung eines virtuellen Produktmodells zurückzuführen, das in digitaler Form im Rechner manipulierbar gespeichert ist [SPUR & KRAUSE 1997].

sche Verkürzung der Entwicklungszeiten, die eine Parallelisierung von Abläufen und eine hohe Prozessdisziplin erzwingt. Mit den Werkzeugen und Methoden der virtuellen Produktentwicklung können im Sinne des Simultaneous Engineering Funktion, Geometrie und Technologie mit ihren wechselseitigen Abhängigkeiten parallel betrachtet werden [SPUR & KRAUSE 1997]. Dies erfordert aber auch ein Umdenken der beteiligten Menschen und eine Veränderung der Prozesse in den Unternehmen. Zentrale Forschungsaufgabe ist und bleibt die Integration der virtuellen Entwicklung in den gesamten Produktenstehungsprozess und die Vernetzung der einzelnen Prozesse zu einem effizienten Entwicklungsprozess. Die integrierte Produktentwicklung nach EHRENSPIEL [2003] stellt eine Metamethodik dar, die die gesamte Produkterstellung unterstützt. SCHWANKL [2002] liefert eine Definition im Sinne der vorliegenden Arbeit: neben diversen Strategien und Methoden zur Unterstützung der einzelnen Schritte stellt die integrierte Produktentwicklung auch diverse Werkzeuge und Hilfsmittel zur Verfügung. Zwei dieser Werkzeuge sind die Prozesse der Konstruktion und Berechnung mit CAx-Hilfsmitteln, von deren Zusammenspiel die Qualität des Produktes maßgeblich abhängt. Aufbauend auf zahlreichen Forschungs- und Industriearbeiten zum Thema Integration von Gestaltung und Berechnung ist diese Arbeit im Rahmen eines Forschungsprojektes des Lehrstuhls für Produktentwicklung mit einem Industrieunternehmen entstanden. Der Fokus des Forschungsprojektes liegt auf dem Zusammenspiel von CAD-Konstruktion und numerischer Berechnung am Beispiel einer PKW-Karosserie². In die Betrachtung miteinbezogen werden dabei die relevanten funktionalen Anforderungen an die Karosserie und das Gesamtfahrzeug, sofern hier in der Auslegung mit numerischen Simulationsverfahren gearbeitet wird. Die Arbeit ordnet sich bewusst in das Themengebiet virtuelle Produktentwicklung ein, daher wird das Themengebiet Versuch und damit zusammenhängend CAT völlig ausgeklammert. Eine Vernetzung von Berechnung und Versuch ist für einen funktionierenden Entwicklungsprozess genauso notwendig, die Ziele sind aber andere, es geht dabei schwerpunktmäßig um die Validierung bzw. Bestätigung von Berechnungsergebnissen. Die Arbeitsschwerpunkte des Versuchs sind über den Entwicklungsprozess anders verteilt als die der Berechnung. Außerdem gleichen sich die Berechnung und der Versuch hinsichtlich ihrer Bedeutung mit steigender Leistungsfähigkeit der numerischen Berechnung an, da sich nur mit der Berechnung signifikant Zeit und Kosten reduzieren lassen, wie in Abbildung 1-2 dargestellt [LINDEMANN 2007].

² Im Rahmen der Arbeit wird die PKW-Karosserie als Einheit von Rohkarosseriestruktur mit Türen und Klappen sowie Anbauteilen und der Innenausstattung behandelt und kann somit als maßgeblicher Einflussfaktor auf die Gesamtfahrzeugeigenschaften gesehen werden.

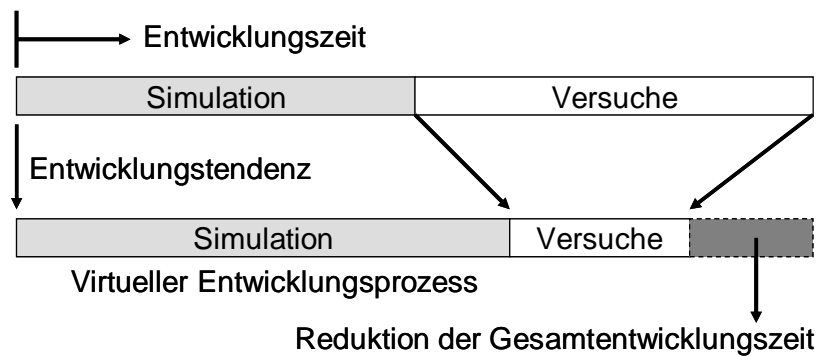


Abbildung 1-2: Reduktion der Entwicklungszeit durch Simulation [LINDEMANN 2007]

Eine Integration von Konstruktion und Berechnung darf sich nicht nur auf bestimmte Phasen des Prozesses beschränken, sonst geht die Durchgängigkeit verloren und entwickelte Methoden und Lösungen haben lediglich singulären Charakter und sind nur für bestimmte Problemstellungen gültig. Zu beachten ist, dass sich im Entwicklungsprozess Informationen, Daten und Modelle evolutionär entwickeln und die Entwicklungsphasen fließend ineinander übergehen. Eine scharfe Trennung ist in den meisten Unternehmen weder zeitlich bzw. räumlich noch organisatorisch vorhanden, so dass sich eine Integration von Konstruktion und Berechnung auf alle Phasen des Produktentwicklungsprozesses konzentrieren und den wechselseitigen Randbedingungen genügen muss. Dies gilt umso mehr, als die Betrachtung von funktionalen Eigenschaften in der Konzeptphase bedingt durch die gestiegenen Anforderungen an die Produkte immer wichtiger wird. In frühen Phasen der Produktentwicklung kann die Simulation wesentlich wirksamer die Änderungskosten des Produktes beeinflussen, wie in Abbildung 1-3 nach LINDEMANN [2007] dargestellt ist. Die Wirksamkeit der Simulation bzgl. der Änderungskosten über der Entwicklungszeit nimmt naturgemäß ab, da in späten Phasen die Änderungen aufwendiger und somit teurer werden, vor allem weil Änderungen im Entwurf, d. h. die CAD- und CAE-Modell in der Regel nur einen Bruchteil der Werkzeugänderungskosten ausmachen. Die besondere Bedeutung von technischen Änderungen und deren Konsequenzen auf die Faktoren Zeit und Qualität hebt CONRAT [1998] hervor: eine verspätete Markteinführung kann zu Ergebniseinbußen führen, die Qualität wird zwar prinzipiell bei Änderungen besser, da die meisten Änderungen das Potential zur Qualitätsverbesserung bieten, aber auch hier gilt, dass Änderungen zu Inkonsistenzen, zumal bei komplexen Produkten, führen können und Entwicklungs- und Fertigungskapazitäten binden. Die Simulation in der virtuellen Produktentwicklung kann hier einen erheblichen Beitrag zur Kostenreduktion und Qualitätsverbesserung leisten, wenn ihre Potentiale voll ausgeschöpft werden und sie vollständig in den Entwicklungsprozess integriert ist.

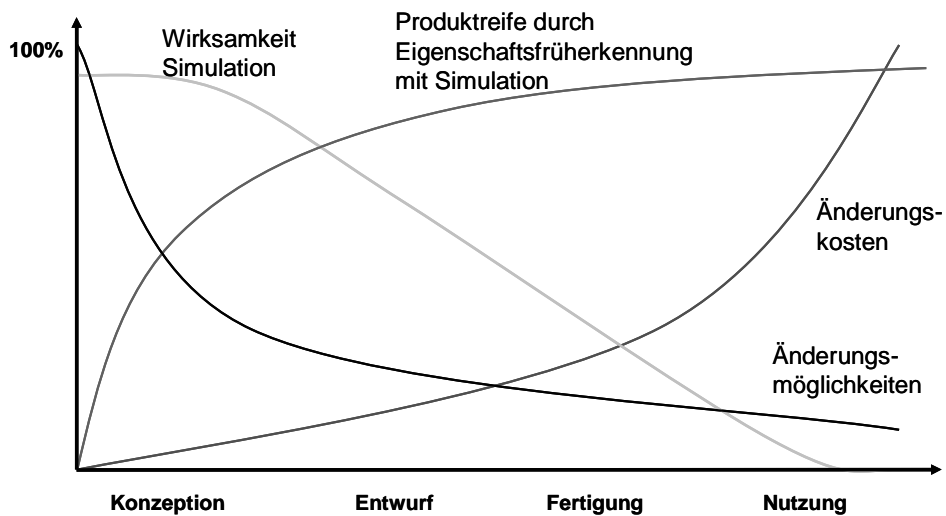


Abbildung 1-3: Wirksamkeit und Steigerung der Produktreife durch numerische Simulation [NACH LINDEMANN 2007]

1.1 Thematik der Arbeit

1.1.1 Begriffsdefinition und Systemgrenze der Arbeit

Zum besseren Verständnis der Arbeit werden die Begrifflichkeiten, die im Kontext der Arbeit eine Rolle spielen, kurz definiert. Für weitere Definitionen und Erläuterungen von Abkürzungen sei auf das Glossar in Kapitel 8.1 verwiesen.

Unter **Integration** (lat.: integrare = wiederherstellen, ergänzen, ein Ganzes ausmachen) wird die Vernetzung von zwei Prozessen, in diesem Fall Konstruktion und Berechnung, verstanden, die sich in Form einer effizienten Kommunikation und Kollaboration niederschlägt. Wichtig ist, dass die Prozesse nicht verschmelzen, d. h. dass der eine im anderen aufgeht, sondern dass sie gleichberechtigt nebeneinander existieren und sich optimal vernetzen können.

Der Begriff **Struktur** (lat.: structura = Bauwerk, Zusammenfügen, Ordnung) kann vielfältig beschrieben werden und wird in der Literatur auch nicht einheitlich beschrieben. Die Definition von DICHTL & ISSING [1993] ordnet der Struktur nur die Relationen³ zwischen den Ele-

³ Durch eine Relation werden zwei Objekte miteinander in Verbindung gesetzt. Dieser Verbindung können unterschiedliche Charakteristika zugeordnet werden [EHRENSPIEL 2003].

menten eines Systems zu, die Elemente selbst gehören nicht dazu. Diese Definition ist für die Integration von Konstruktion und Simulation nicht geeignet, da die Elemente des Systems in Form von Komponenten und funktionalen Eigenschaften, siehe unten, eine erhebliche Rolle in der Beschreibung des Systems spielen. Nach DAENZER & HUBER [2002] bilden die Elemente und Beziehungen eines Systems ein Gefüge und weisen damit eine Ordnung auf, die Struktur eines Systems. Im Kontext der Arbeit wird diese Definition einer Struktur und die von RAPP [1999] übernommen: Struktur ist die Manifestation einer bestimmten Ordnung in einem vorgegeben Bezugsrahmen. Diese Ordnung entspricht dem System, in diesem Falle die Konstruktion und die Simulation.

Simulation ist nach der VDI-RICHTLINIE 3633 [1993] die Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind [GAUSEMEIER ET AL 2000]. Damit kann Simulation sowohl mit virtuellen Modellen aus der Berechnung als auch mit physischen Ersatzmodellen im Versuch durchgeführt werden. Der Ausdruck Simulation im Rahmen der Arbeit bezieht sich nur auf die Berechnung, die in Kapitel 2.2.2 genauer definiert wird, nicht auf den Versuch.

Als **Komponenten** werden in der Arbeit Subsysteme eines Produktes verstanden, die sich sinnvoll zu einer funktionalen Einheit gliedern lassen. Das bedeutet, dass eine Komponente sowohl eine Baugruppe, z. B. eine Schalttafel oder ein Airbagsystem, als auch ein Einzelteil, z. B. ein Blechteil der Rohkarosserie, das von herausragender Bedeutung für eine bestimmte Eigenschaft ist, sein kann. Dies deckt sich weitgehend mit der Definition nach DROSDOWSKI [1990], nach der eine Komponente Teil eines Ganzen ist, aber es ist nicht spezifiziert, welchen Umfang das Teil hat.

Eine **Funktion** wird nach EHRENSPIEL [2003] definiert als lösungsneutrale Formulierung des gewollten Zwecks eines Produkts, die die Zustandsänderung eines Umsatzproduktes ausdrückt, welche durch den Funktionsträger bewirkt wird. Das bedeutet, dass sich die Eigenschaften des Produktes in irgendeiner Form ändern. Funktionen können hierarchisch gegliedert werden, d. h. es können Funktionen für das Gesamt- wie für Subsysteme definiert werden, siehe dazu Kapitel 5.1. Für die Problemstellung der Integration von Konstruktion und Simulation bedeutet das, dass z. B. durch die Zustandsänderung von Subsystemen gewünschte Fahrzeugeigenschaften erreicht werden. Diese Funktionen werden in der z. B. Fahrzeugentwicklung mithilfe der Simulation entwickelt, so wird beispielsweise der Klimakreislauf eines Fahrzeugs mit der Strömungssimulation ausgelegt um die gewünschten funktionalen Eigenschaften zu erreichen.

Als **funktionale Eigenschaften** werden im Folgenden alle mit numerischen Berechnungsverfahren erfassbaren physikalischen Eigenschaften verstanden, also Eigenschaften, die in der Simulation ermittelt werden. Eine Eigenschaft besteht nach LINDEMANN [2007] aus einem Merkmal und eine Ausprägung, in dem in Abbildung 1-4 gezeigten Beispiel sind das Merkmal die erste Torsionseigenfrequenz, die Ausprägung der Zahlenwert von 30Hz. Weitere Anforderungen⁴ an das Produkt, wie z. B. Herstellbarkeit, etc., werden nicht berücksichtigt. Die

⁴ Anforderungen können sowohl Funktionen (z. B. an ein Verkehrsmittel „Fahren“), als auch Eigenschaften (z. B. Geschwindigkeit $\geq 200\text{km/h}$) beinhalten [CROSS 1996].

Eigenschaften des Produktes resultieren aus Anforderungen an das Produkt, wie z. B. Steifigkeit, Crashverhalten, etc. und diese werden von der Simulation in berechenbare Einheiten, so genannte Lastfälle, übergeführt. Eine Anforderung wird in der Berechnung somit in einen Lastfall übersetzt, der simuliert und ausgewertet wird. Das Ergebnis ist schließlich die funktionale Eigenschaft des Produktes, die dann wiederum mit den Anforderungen abgeglichen werden muss. Die prinzipielle Systematik und der Zusammenhang von Funktion und funktionalen Eigenschaften mit einem Beispiel aus der Fahrzeugentwicklung ist in Abbildung 1-4 dargestellt. Letztlich tragen die Komponenten zur Erfüllung von Funktionen bei und müssen dazu bestimmte Eigenschaften haben, die in der Simulation ermittelt und optimiert werden. Somit ist auch klar, dass eine saubere und klare Trennung der Begriffe im Zusammenhang von Konstruktion und Simulation sehr schwer fällt und nicht durchgängig möglich ist, wie in Kapitel 5 gezeigt werden wird.

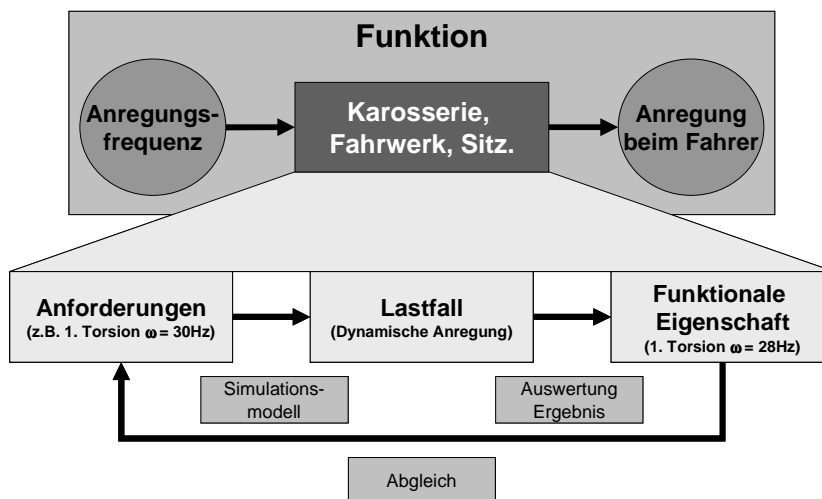


Abbildung 1-4: Definition und Zusammenhang von Funktionen, Anforderungen, Lastfällen und funktionalen Eigenschaften

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Integration von CAD und CAE und bezieht wie oben erwähnt den Versuch mit CAT nicht in die Betrachtungen mit ein. Die Integration von Konstruktion und Simulation ist wegen der vielen Einflüsse (Produkt, Berechnungsmethoden, Prozess, etc.) ein sehr weit gespanntes Forschungsgebiet, daher wird an dieser Stelle eine Systemgrenze definiert, die eine detailliertere Analyse des Themas erlaubt. Es werden alle Phasen des Entwicklungsprozesses in die Untersuchungen mit einbezogen, sowohl frühe Phasen mit den typischen Eigenschaften einer Konzeptfindung, als auch die späteren Phasen der Serienentwicklung mit dem ihr eigenen sehr hohen Anspruch an Exaktheit. Die Berechnung bezieht sich ausschließlich auf die numerische Simulation von mechanischen Anforderungen, weitere Berechnungsmethoden werden nicht betrachtet. In der Fahrzeugentwicklung und dort im speziellen die Karosserieentwicklung stehen die typischen Berechnungsdisziplinen im Vordergrund, Steifigkeit, Crash, Akustik, Insassen- und Fußgängerschutz sowie diverse Komponentenlastfälle.

1.1.2 Ausgangssituation

Der Titel des DFG-Schwerpunktprogrammes SPP732 lautet „Integration von Gestaltung⁵ und Berechnung“ und bildet in einigen Ansätzen Grundlage für einen Teil der vorliegenden Arbeit. Der Titel spiegelt jedoch nicht mehr genau die Realität wider, denn der Konstruktionsprozess ist von einem tief greifenden Wandel gekennzeichnet. Verantwortlich für diesen Wandel ist die Rolle der Berechnung, die nicht mehr eine reine Kontrolle und Optimierung von vorhandenen Konstruktionen darstellt, sondern selbst eine gestaltende Rolle im Entwicklungsprozess spielt. In der Berechnung nehmen die Berechnungstiefe, also das Niveau der Ergebnisse, und die Berechnungsbreite, d. h. die Breite der physikalischen Gebiete, wie z. B. der Einfluss von Temperatur auf das Bauteilverhalten, Zusammenspiel mit Elektrik/Elektronik, etc., tendenziell stark zu und werden bestimmende Faktoren in Forschung und Technik der nächsten Jahre [GROßMANN 1998]. Durch die Zunahme der Anforderungen an die Produkte erhöhen sich die Herausforderungen an die Konstruktion und Simulation deutlich. Folgende Graphik in Abbildung 1-5 zeigt exemplarisch die Zunahmen der Anforderungen vom Gesetzgeber und von Verbraucherschutztests an die Sicherheit von Fahrzeugen für den internationalen Markt in den letzten Jahren.

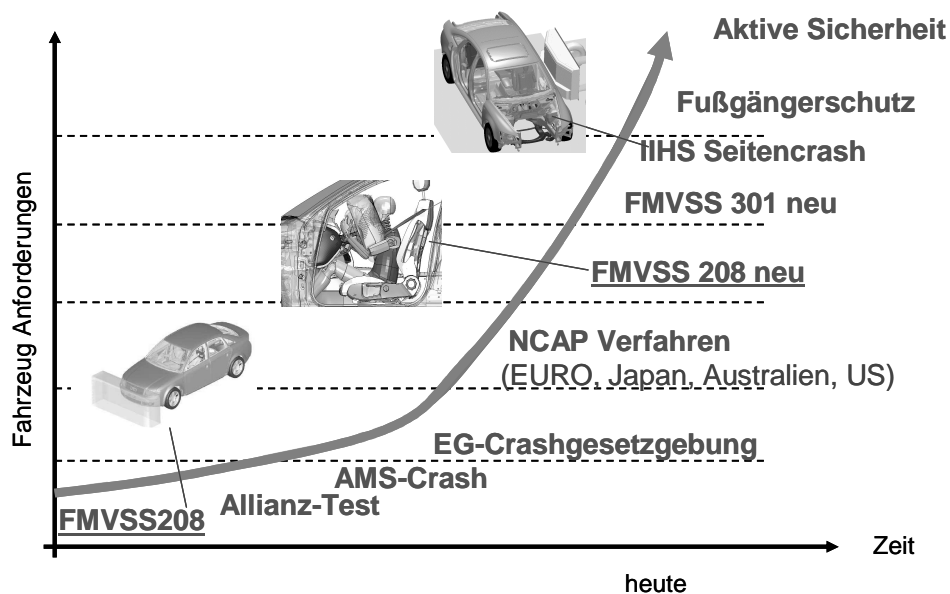


Abbildung 1-5: Zunahme der Sicherheitsanforderungen⁶ an einen PKW [HERFELD ET AL 2006]

⁵ In der Arbeit ist die Gestaltung durch die Konstruktion ersetzt, denn an der Gestalt des Produktes wirken Konstruktion und Berechnung mit, so dass das Wort Gestaltung implizit bereits die Integration enthält.

⁶ Die Abkürzungen (FMVSS, NCAP, etc.) werden im Glossar in Kapitel 8.1 erläutert.

Die stark gestiegenen Anforderungen werden zusätzlich überlagert durch eine Vielzahl von neuen Fahrzeugtypen und Marktsegmenten. Der Trend zur Individualisierung nimmt zu, ein Ende ist derzeit nicht in Sicht, die Automobilhersteller erweitern ihre Angebotspalette kontinuierlich [BALASUBRAMANIAN & WINTERSTEIN 1998]. Abbildung 1-6 stellt die zunehmende Fragmentierung des Automobilmarktes dar, innerhalb von 20 Jahren hat sich die Anzahl der Segmente mehr als vervierfacht. Besonders wichtig ist den Kunden hierbei der Preis gepaart mit Vielseitigkeit und Nutzen, aber auch einem hohen Maße an Individualität, wobei an der Graphik abzulesen ist, dass die größten Volumen natürlich nach wie vor bei den preisgünstigeren Modellen zu erzielen sind (der Durchmesser der Kreise entspricht in etwa dem Marktvolumen). Für die Fahrzeughersteller bedeutet das, Trends zu setzen und auf die Kundenbedürfnisse noch stärker einzugehen und dennoch eine wettbewerbsfähige Preispolitik zu gestalten. Um schnell auf die Bedürfnisse des Marktes eingehen zu können, haben sich die Entwicklungszeiten z. T. drastisch verkürzt, etwa um ein Drittel von 30 auf 20 Monate [LEPPER 2004], die Entwicklungskosten sind gemessen an den Anforderungen jedoch eher zurückgegangen. Dies bedeutet oft weniger Prototypen und weniger Versuche, dafür eine stärkere Betonung auf der virtuellen Produktentwicklung. Einige Fahrzeuge, vornehmlich Derivate auf bestehenden Plattformen, werden bereits vollständig ohne Prototypen entwickelt, die Versuche mit den ersten Vorserienfahrzeugen dienen lediglich der Bestätigung der Simulation. Ein erstes Beispiel dazu ist die Entwicklung des Chrysler Crossfire bei der Karmann GmbH [SANDFORT & KLEINE TRIMPE 2004], der innerhalb von 18 Monaten auf einer bestehenden Plattform ohne Prototypenbaustufe entwickelt wurde.

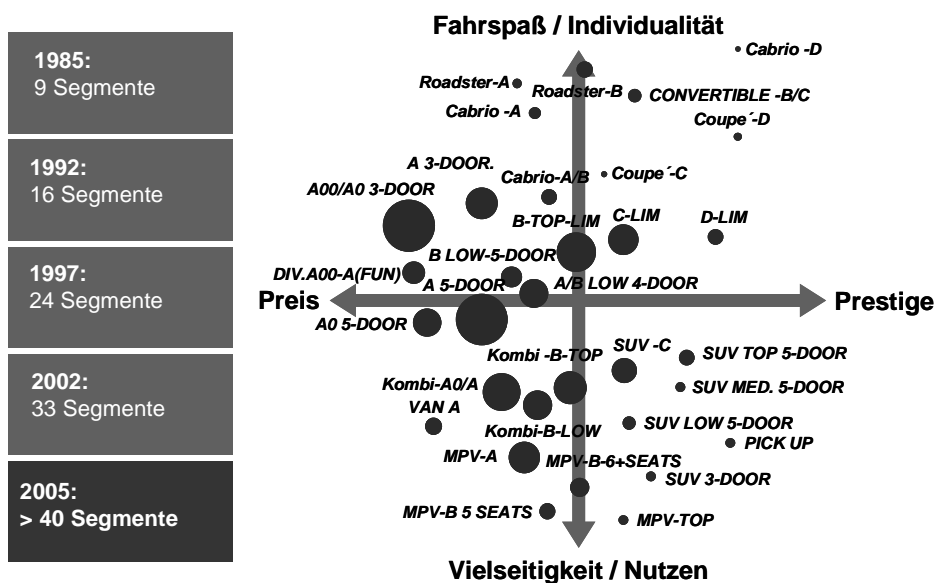


Abbildung 1-6: Zusätzliche Segmente im Automobilmarkt [HERFELD ET AL 2006]

Damit kommt der virtuellen Entwicklung in den Unternehmen eine sehr hohe Bedeutung zu, ohne den Einsatz von rechnergestütztem Design, Konstruktion, Simulation, Werkzeug- und

Fertigungsplanung ist eine Fahrzeugentwicklung nicht mehr denkbar. Zur Bewältigung der zunehmenden Anforderungen stehen der Konstruktion und Berechnung leistungsfähige CAX-Werkzeuge zur Verfügung, die sich permanent weiterentwickeln und einen ständigen Wandel in der Organisation von Entwicklungsprozessen erforderlich machen. Die Konstruktion hat durch parametrisch-assoziative CAD-Methoden und eine durchgängige 3D-Prozesskette große Fortschritte gemacht, die Berechnung hat ihre Prognosefähigkeit in Form von Qualität und Quantität ihrer Ergebnisse in den vergangenen Jahren enorm gesteigert. Die Integration von Konstruktion und Simulation in der Produktentwicklung ist eine der großen Herausforderungen in der Forschung und der Industrie, weil nur eine integrierte CAX-Prozesskette in der virtuellen Entwicklung eine weitere spürbare Effizienzsteigerung in der Entwicklung verspricht.

1.1.3 Problemstellung der Arbeit

Die Entwicklung von komplexen Produkten wie dem Automobil mit den gegebenen Randbedingungen erfordert neue Ansätze in Forschung und Technik zu einer nachhaltigen Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen. Mit den kurzen Entwicklungszeiten und geringeren Entwicklungskosten spielt die virtuelle Entwicklung mit ihren Subdisziplinen Konstruktion und Simulation eine Schlüsselrolle. Plattformstrategien zur Erreichung der Modellvielfalt bei gleichzeitiger Beherrschung der Entwicklungs- und Fertigungskosten schaffen Synergien, deren Nutzung durch den Einsatz von virtuellen Techniken noch deutlich verstärkt werden kann. Die Charakteristik der Produkte geht in erster Linie auf Eigenschaften zurück, die von Ingenieuren bewusst entwickelt werden und die nur mit Unterstützung der Simulation erreicht werden können [CURRY 2003]. Die Einzelsysteme in den virtuellen Techniken haben ein hohes Niveau erreicht, große Verbesserungssprünge sind nicht zu erwarten, eher ein kontinuierlicher, evolutionärer Verbesserungsprozess. Ein Problem stellt nach wie vor die Integration der Einzelsysteme und -disziplinen dar. Wie arbeiten die Konstruktion und die Simulation unter den gegebenen Randbedingungen in der Entwicklung effizient zusammen und wie funktioniert die Kommunikation so reibungslos, dass wenige zeit- und kostenintensive Änderungsschleifen entstehen und ein hohes Maß an Absicherung bezüglich funktionaler Eigenschaften erreicht werden kann, ohne dass sich später in den Versuchen teure, funktional bedingte Änderungen ergeben. Eine Disziplin alleine, sei es die Konstruktion oder die Simulation, wird nicht in der Lage sein, die geforderte Verbesserung in Form von Effizienzsteigerungen zu erreichen, dies wird nur gemeinsam möglich sein. Hier gilt es auch, den Trend zur weiteren Spezialisierung und damit eher zur Segregation denn zur Integration aufzuhalten, der durch die steigende Komplexität von Produkt, Datenmanagement und Werkzeuge der Einzeldisziplinen verursacht wird [BURR ET AL 2004].

Überlagert werden die in Kapitel 1.1.1 geschilderte Variantenvielfalt und die steigenden Anforderungen an die Fahrzeuge durch eine steigende Komplexität, die in Funktions-, Produktprogramm- und Netzwerkkomplexität aufgespaltet werden kann [KRUMM 2004]. Komplexitätsbeherrschung kann aber nicht darin enden, die Variantenvielfalt zu reduzieren, zumal die Notwendigkeit der Unternehmen, sich durch individuelle Produkte abzugrenzen, immer essentieller werden [LINDEMANN 2004A], sondern muss dem Entwickler die Möglichkeit bieten, komplexe Systeme aufzulösen und ihre entscheidenden Relationen und Einflüsse zu verstehen. Die Beherrschung der Prozesse in der virtuellen Produktentwicklung ist eine Vorausset-

zung zur Beherrschung dieser Komplexität. Somit ergibt sich die Herausforderung einer Integration der virtuellen Prozesse von Konstruktion und Simulation vor dem Hintergrund differenzierter Sichtweisen auf das Gesamtprodukt und einer Multiprojektlandschaft mit steigenden Ansprüchen an die Produkte und Prozesse, die stets besondere Schwierigkeiten für die Komplexitätsbeherrschung darstellt [DANILOVIC & BÖRJESSON 2001].

Zahlreiche Anstrengungen in Forschung und Industrie zu diesem Themengebiet zeigen die hohe Bedeutung der Integration von Konstruktion und Simulation. Dennoch ist das Problem weit weg von einer umfassenden Lösung, die nur im Kontext aller Einflussfaktoren geschehen kann und nur bis zu einem gewissen Grad Allgemeingültigkeit besitzen wird. Der größte Teil der Veröffentlichungen zur Integration von Konstruktion und Simulation grenzt die Thematik stark auf wenige Dimensionen ein (siehe dazu Kapitel 3.2.1) und entwickelt Ansätze, die die Problematik häufig stark vereinfachen (siehe Kapitel 2.3). Die Integration wird nicht als mehrdimensionales Problem aufgefasst, sondern meist durch Simplifizierung auf einen eindimensionalen Lösungsansatz reduziert (siehe Kapitel 3.2.2). Die nächste Stufe der Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet muss folglich die Entwicklung von Lösungen unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse und Dimensionen sein. Dabei gilt es natürlich auch, die bisher erarbeiteten Ergebnisse in einen sinnvollen Gesamtkontext zu stellen. In Kapitel 3.2 wird ein Problemsystem der Integration entwickelt, das die mehrdimensionale Problematik der Integration von Konstruktion und Simulation ausführlich entwickelt.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Integration von zwei Kernprozessen der virtuellen Produktentwicklung, der Konstruktion und der numerischen Simulation. Dabei ist es das Ziel, einen gesamtheitlichen Blick auf die Problematik zu entwickeln und der Komplexität der Aufgabe mit ihren Randbedingungen gerecht zu werden. Allein durch die Weiterentwicklung und Implementierung von Softwarelösungen im Bereich der CAx- und PDM-Systeme wird keine nachhaltige Integration von Konstruktion und Simulation zu erreichen sein. Wie RANGAN ET AL [2005] betonen, ist für eine Veränderung z. B. in Form einer Integration von Teilprozessen neben den technischen Voraussetzungen die Berücksichtigung menschlicher Faktoren, wie z. B. Planung und persönliche Fähigkeiten, in Form einer Zustimmung zu Veränderungsprozessen, extrem wichtig. Nach RANGAN ET AL [2005] spielt die gewählte Technologie neben dem Prozess und motivierten und fähigen Menschen eine untergeordnete Rolle für den Erfolg bei der Einführung von Systemen. Für eine Integration von Teilprozessen müssen folglich alle Dimensionen des Problems erfasst, berücksichtigt und behandelt werden. Im Vordergrund stehen hier eine effiziente Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen den beteiligten Ingenieuren in der Konstruktion und Simulation, um eine optimale Auslegung des Produktes hinsichtlich der geforderten Anforderungen zu erreichen. Dies gilt umso mehr, als viele Probleme, die sich auf den reinen Datenübertrag von der Konstruktion in die Berechnung und umgekehrt beziehen, gelöst sind, wie in Kapitel 2 gezeigt wird. Ab einer bestimmten Komplexität des Produktes, die wiederum eine hohe Komplexität

der Prozesse, IT-Systeme und Anforderungen⁷ nach sich zieht, sind diese Verfahren nach dem derzeitigen Stand der Technik jedoch im industriellen Umfeld einer PKW-Entwicklung nicht oder nur sehr bedingt praktikabel, so dass sich eine Integration von Konstruktion und Simulation auf weiterführende Ansätze erstrecken muss. Die Arbeit grenzt sich somit definitiv ab von den bisher praktizierten Ansätzen auf dem Gebiet der CAx-Integration, die sich mehrheitlich mit einer Integration von CAx-Werkzeugen und Daten beschäftigen.

Die Basis für die Analyse bildet die Aufspaltung des Problems in mehrere Dimensionen, um einen breiteren Betrachtungshorizont zu ermöglichen und Teilaspekte gezielt zu adressieren. Besondere Beachtung findet dabei die rechnergestützte Produktentwicklung, ohne die derart komplexe Entwicklungen wie ein Fahrzeug mit den gegebenen Anforderungen nicht möglich wäre. Daher gilt dem richtigen Einsatz von CAx-Werkzeugen und dem dazugehörigen Datenmanagement eine erhöhte Aufmerksamkeit. Kernidee der Arbeit ist, durch die Verknüpfung von Komponenten und funktionalen Eigenschaften in komplexen Systemen wie dem Automobil unter Berücksichtigung der Randbedingungen in Form aller Dimensionen eine Methode zur Verfügung zu stellen, die sowohl die Informationsflüsse als auch die Informationsbedürfnisse zwischen Konstruktion und Simulation nachhaltig, also auch im Sinne der Anwender, verbessert. Es soll ein Beitrag geleistet werden, um die Transparenz im Entwicklungsprozess zu erhöhen und den Beteiligten zur richtigen Zeit die richtigen Informationen zur Verfügung zu stellen. Dabei ist vor allem wichtig, um die Informationsbedürfnisse des anderen zu wissen. In Abbildung 1-7 ist die Zielsetzung der Arbeit grafisch dargestellt: Verbesserung der Kollaboration und Kommunikation zwischen Konstruktion und numerischer Simulation über den gesamten Prozess, verstanden als ganzheitlicher Ansatz mit der Berücksichtigung aller Einflüsse auf den Entwicklungsprozess.

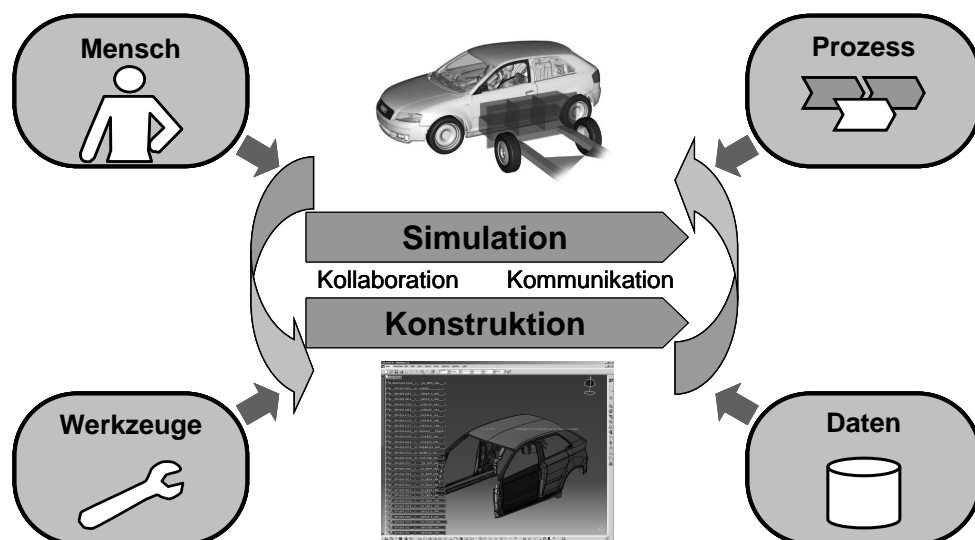


Abbildung 1-7: Zielsetzung der Arbeit

⁷ Streng genommen ist die Reihenfolge umgekehrt, aus der Komplexität der Anforderungen resultiert die Produktkomplexität.

1.3 Erfahrungsgrundlage der Arbeit und wissenschaftlicher Ansatz

Basis der Arbeit bildet ein Forschungsprojekt des Lehrstuhls für Produktentwicklung mit einem Partner aus der Automobilindustrie, das sich von Oktober 2004 bis Oktober 2006 mit der Integration von Konstruktion und numerischer Simulation beschäftigt (im Folgenden CAD-CAE-Integrationsprojekt genannt). Produktfokus des Projekts ist die Karosserieentwicklung unter Berücksichtigung von Gesamtfahrzeugeigenschaften, um der Komplexität von realen Entwicklungsprozessen Rechnung zu tragen. Von besonderem Interesse für das Projekt ist der Abgleich des Standes der Technik in Forschung und Industrie und die Übertragbarkeit und Skalierbarkeit von bislang auf diesem Themengebiet erarbeiteten Einzellösungen. Hier hat sich gezeigt, dass nach wie vor eine Lücke zwischen den Ergebnissen der Forschung und ihrer tatsächlichen Anwendbarkeit im industriellen Umfeld klafft, das speziell im Bereich Datenmanagement, CA-Werkzeuge und Prozesse sehr heterogen ist und hier häufig firmenspezifische Lösungen dominieren, die Umsetzungen von Forschungsergebnissen erschweren oder z. T. sogar wegen des hohen Aufwandes unmöglich machen. Viele Erkenntnisse aus der Forschung, speziell auch im Bereich der IT-Lösungen, haben trotz hohen Potentials noch nicht den Weg in die industrielle Anwendung gefunden, was für den teilweise visionären Charakter der Lösungen spricht.

Ziel des Projektes war demzufolge auch, durch die Analyse des industriellen Umfelds und dem Abgleich mit dem Stand der Forschung nachhaltige, skalierbare und übertragbare Lösungen für die Integration von Konstruktion und numerischer Simulation zu entwickeln, die von den Anwendern akzeptiert und genutzt werden. Es ist besonders wichtig, bei der Optimierung von Entwicklungsprozessen und -werkzeugen den Kunden, und damit sind sowohl der Endkunde als auch der Anwender von Lösungen in Form der Entwicklungsingenieure gemeint, nicht aus den Augen zu verlieren und sich bewusst zu machen, dass eine Effizienzsteigerung der Wettbewerbsfähigkeit zugute kommt. Eine Integration von Teilprozessen und Softwaresystemen ist demzufolge kein Selbstzweck, sondern stets unter diesem Aspekt zu betrachten. Aus diesem Grunde wird in der Arbeit auch großer Wert darauf gelegt, die Erfahrungen und Forderungen von Ingenieuren aus der Konstruktion und Simulation in komplexen Produktentwicklungsprozessen mit einzubeziehen. Dies geschieht in Form von Umfragen und Studien in der Industrie, die analysiert werden und aus den Analyseergebnissen können dann die Schlussfolgerungen gezogen werden, welche Handlungsfelder schwerpunktmäßig zu betrachten sind. Damit ist auch gewährleistet, dass die wissenschaftliche Herangehensweise an die Problemstellung Ansätze und Lösungen generiert, die umsetzbar sind und tatsächlich zu einer gewünschten Effizienzsteigerung in der industriellen Anwendung beitragen. Die wissenschaftliche Vorgehensweise der Arbeit folgt weitgehend dem Münchner Vorgehensmodell nach LINDEMANN [2007], wengleich die letzten Schritte nicht vollständig durchgeführt werden: nach der Zielsetzung der Arbeit wird der Stand der Technik und das Problem analysiert, daraus folgt dann eine Strukturierung in Form der Definition der Handlungsfelder. Anschließend wird eine Lösung gesucht, die zu dem definierten Problem passt und deren Eigenschaften ermittelt werden, d. h. wie kann eine mögliche Umsetzung aussehen und welche Randbedingungen sind zu berücksichtigen. Die entwickelten Lösungen werden aktuell im industriellen Umfeld weiterentwickelt und implementiert.

In die Arbeit fließen auch persönliche, berufliche Erfahrungen des Autors mit ein, die sich aus der Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Berechnung in verschiedenen Disziplinen speist. Die Erfahrungen stammen sowohl aus dem Umfeld der Konstruktion von Rohbaustruktur und Innenausstattungs-komponenten, als auch aus der Verantwortung für Sicherheitsumfänge am Fahrzeug. Somit bleibt es auch nicht aus, dass einige Thesen der vorliegenden Arbeit sich nicht auf die Literatur beziehen, sondern aus persönlichen Beobachtungen und Erfahrungen des Autors im Umfeld des Konstruktions- und Berechnungsprozesses stammen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich am wissenschaftlichen Vorgehen und den Zielen der Arbeit. Die Kapitelstruktur ist in Abbildung 1-8 dargestellt und zeigt den logischen Aufbau der Arbeit.

In Kapitel 2 werden die Grundlagen zum Verständnis der Problematik erläutert. Dies schließt eine kurze Darstellung der Karosserieentwicklung ein, um das Grundverständnis für das definierte Beispielprodukt zu schaffen. Da sowohl Konstruktion als auch Simulation auf modernen CAx-Systemen basieren, werden die Grundzüge der rechnergestützten Produktentwicklung erläutert. Danach wird der Stand der Technik zur Integration von Konstruktion und Simulation ausführlich analysiert und die wichtigsten Ansätze vorgestellt. Diese Ausführlichkeit ist geboten, da viele Arbeiten aus Forschung und Industrie zu diesem Themengebiet existieren, die bei der Entwicklung von neuen Lösungen berücksichtigt werden müssen und ebenfalls zum Grundverständnis des Problems beitragen.

Die bereits erwähnten Anwenderbefragungen werden in Kapitel 3 geschildert und dann aus dem Stand der Technik gepaart mit den Analysen und Ergebnissen der Befragungen ein Handlungs- und Problemsystem entwickelt, das auch in Zukunft eine strukturierte Bearbeitung des Themengebietes erlaubt. Dabei wird auch deutlich, warum eine ganzheitlichere Betrachtung des Problems notwendig ist, um Lösungen zu finden, die auf eine Integration von Teilprozessen zielen.

In Kapitel 4 wird detaillierter auf die Kommunikation zwischen Konstruktion und Simulation eingegangen, die eine große Rolle für die Integration spielt. Dabei werden Strukturen und Prozesse einer erfolgreichen Kommunikation diskutiert und die Kommunikation in komplexen Strukturen analysiert, wie sie die Fahrzeugentwicklung darstellt. Zentrale Fragestellung ist, welche Informationen von der Konstruktion in die Simulation übertragen werden und umgekehrt und was jeweils überhaupt benötigt wird.

In Kapitel 5 werden die Grundlagen für eine Systematisierung und Strukturierung der Kommunikation durch die Verknüpfung von Komponenten und funktionalen Eigenschaften gelegt. Es wird gezeigt, warum es sich bei der Integration von Konstruktion und Simulation um ein komplexes System handelt. Dazu werden die unterschiedlichen Strukturierungsmethoden von Produkten und funktionalen Eigenschaften bzw. Funktionen an sich erläutert. Ergebnis der Verknüpfung ist eine Matrix, die Bauteil-Lastfall-Matrix, die die Beziehungen zwischen Komponenten und funktionalen Eigenschaften abbildet.

Im 6. Kapitel werden Anwendungsmöglichkeiten der Bauteil-Lastfall-Matrix vorgestellt, die der Unterstützung der Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Simulation dienen. Dabei kann gezeigt werden, dass die vorgestellte Theorie in einer Validierung in der Praxis bereits hinsichtlich ihrer Richtigkeit und Anwendbarkeit bestätigt wurde. Anwendungen sind dabei die Strukturierung von funktionsorientierten Teams und die Unterstützung von Informationsflüssen zwischen Konstruktion und Simulation.

Im 7. Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und kritisch diskutiert. Abschließend wird ein Ausblick auf künftige Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der CAD-CAE-Integration vorgestellt und vor allem Weiterentwicklungsmöglichkeiten des gewählten Ansatzes vorgeschlagen.

In der Arbeit wird ein neuer Ansatz entwickelt, die Problematik der Integration von Konstruktion und Simulation in realen Entwicklungsprozessen für Produkte, die sich durch eine hohe Komplexität auszeichnen, ganzheitlich zu analysieren und verknüpfte Handlungsfelder zur Lösung der Einzelprobleme zu definieren. Ein möglicher Lösungsraum wird in der Arbeit mit der Verknüpfung von Komponenten mit Funktionen und Eigenschaften entwickelt. Dazu wird erstmals eine bewährte Methode der Komplexitätsbeherrschung, die Einfluss- und Verknüpfungsmatrix, auf die Integration von Konstruktion und Simulation adaptiert.

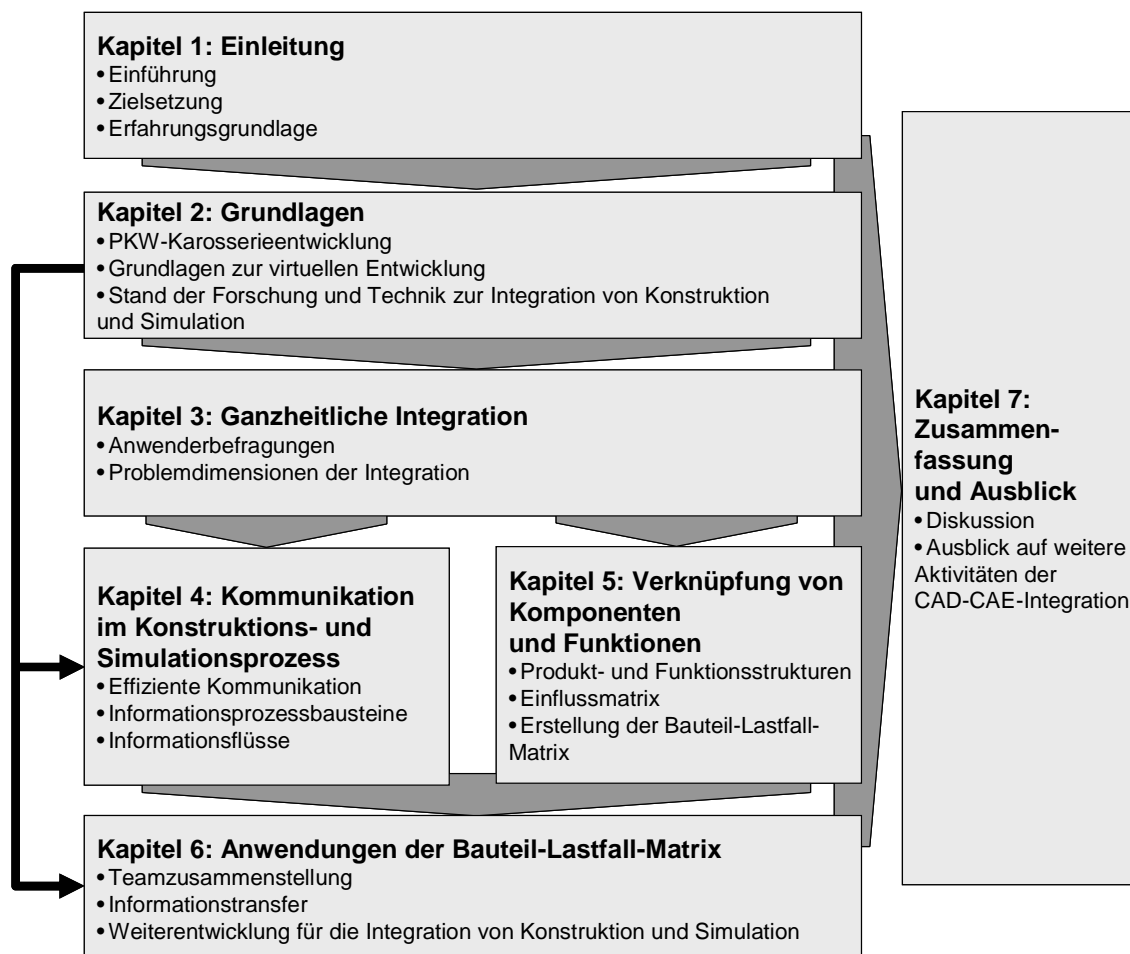


Abbildung 1-8: Aufbau der Arbeit

2. Grundlagen zur Integration von Konstruktion und Simulation

Im folgenden Kapitel wird der Stand der Forschung und Technik zur Integration von Konstruktion und Berechnung aus verschiedenen Perspektiven analysiert. Zuerst wird auf die besonderen Merkmale der Fahrzeugkarosserie eingegangen, da sie ein Produktbeispiel mit hoher Komplexität darstellt und somit eine gute Grundlage für die wissenschaftlichen Betrachtungen hinsichtlich der Integration von Konstruktion und Simulation in der virtuellen Produktentwicklung ist. Die PKW-Entwicklung bildet den Rahmen für die Integrationsansätze, die sich dann an bestimmten Randbedingungen aus der PKW-Entwicklung messen lassen. Die virtuelle Produktentwicklung wird in ihren für die Integration relevanten Einflussgrößen, vornehmlich CAD-, CAE-Werkzeuge und Datenmanagement, vorgestellt; sie bildet die Basis für die meisten Integrationsansätze von Konstruktion und Simulation. Darauf aufbauend wird der Stand der Forschung und Technik sehr ausführlich dargestellt und eine Reihe von Integrationskonzepten und -gedanken dargelegt und diskutiert. Es werden sowohl wissenschaftliche Veröffentlichungen als auch aktuelle Projekte aus der Industrie herangezogen, sofern hier gesicherte, verallgemeinerbare und übertragbare Informationen vorliegen. In Abbildung 2-1 ist der prinzipielle Aufbau des Kapitels gezeigt und wie die einzelnen Teile sich zusammenfügen.

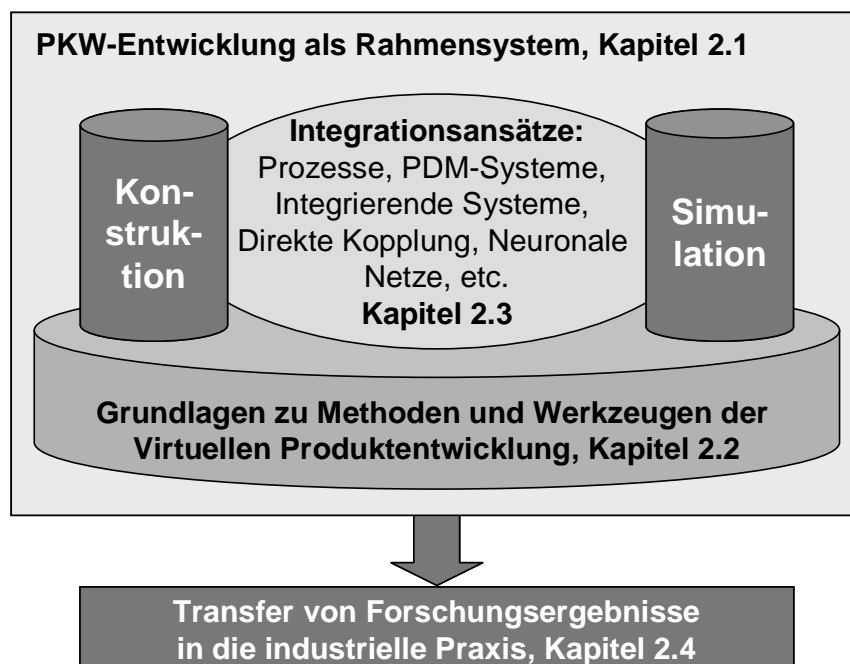


Abbildung 2-1: Struktur und Vernetzung in Kapitel 2

Von besonderem Interesse ist an dieser Stelle, inwieweit die erarbeiteten Ergebnisse aus der Forschung auch Eingang in die Praxis der Unternehmen gefunden haben, vor allem vor dem Hintergrund der Skalierbarkeit und Übertragbarkeit von Methoden und Werkzeugen. Daraus abgeleitet wird der Forschungsbedarf zu einer intensiveren Vernetzung der Bereiche Konstruktion und Berechnung als die zentralen Bereiche der virtuellen Produktentwicklung.

2.1 Produktbeispiel PKW-Karosserieentwicklung

2.1.1 Merkmale der PKW-Karosserie

Zentrales Merkmal der Karosserie ist zunehmend das Design⁸ oder Styling, das häufig für den Erfolg oder Misserfolg von Automobilen auf dem Weltmarkt entscheidend ist [DANKWORT & FAIBT 2002]. Dabei bewegt sich die Karosserie im Spannungsfeld zwischen den ästhetischen und den funktionalen Anforderungen an das Automobil, die sich nicht immer einfach vereinen lassen. Geometrisch regelmäßige Körper sind meist nur bei Anbauteilen und Ausstattung zu finden, die Rohbaustruktur besteht aus Freiformflächen, die stark vom Design der Außenhaut des Fahrzeugs abhängen. Dies ist zu betonen, denn die weitaus größte Zahl der Integrationsprojekte im Bereich Konstruktion und Simulation hat sich bislang mit Volumenkörpern im Maschinenelemente- oder Werkzeugmaschinenbereich beschäftigt. Änderungen in der Karosserie sind selten nur lokal zu begrenzen, da die geometrische und funktionale Abhängigkeit der Teile untereinander extrem hoch ist. Die Fahrzeugkarosserie ist aus einem Werkstoffmix unterschiedlicher Metalle und Kunststoffe mit einer Vielzahl an Fügeverfahren zusammengesetzt. Die Werkstoffe mit ihren Eigenschaften wie Kosten, Gewicht, Umformbarkeit, mechanische Kennwerte, etc. setzen dabei dem Entwickler die Randbedingungen für die Konstruktion der Karosserie. Vorrangiges Entwicklungsziel ist der Strukturleichtbau. Kosten, technische Machbarkeit und eine Reihe weiterer Faktoren sprechen derzeit nicht für einen breiten Einsatz von klassischen Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium und Magnesium, so dass nach wie vor Stahl als Hauptwerkstoff der Rohkarosserie dominiert [VIEHWEGER ET AL 2002].

Die Karosserieentwicklung vollzieht sich nicht, wie sonst im Maschinenbau üblich, von innen nach außen, sondern gleichberechtigt raum- und funktionsorientiert von außen nach innen und designorientiert von innen nach außen, wodurch sich in der Karosserieentwicklung besonders viele Zielkonflikte ergeben [KOLK 2005]. Für die Struktur der Karosserie ist dabei ein wichtiges Kennzeichen, dass die Eigenschaften nur im Zusammenbau der Einzelteile realisiert werden können, d. h. das Einzelteil gewinnt seine Bedeutung erst im Kontext der Baugruppe bzw. des Gesamtfahrzeugs und trägt mit seinen spezifischen Eigenschaften zur Erfüllung der Anforderungen bei. Der Entwurf und die Konstruktion der Karosserie müssen stark vernetzt zwi-

⁸ Der Begriff Design ist in seiner Bedeutung doppeldeutig, er kann sowohl als funktionelles Entwerfen (engl. to design) als auch als Gestaltgebung (to style) verwendet werden. Im Kontext dieser Arbeit ist die dem Englischen style entsprechende Bedeutung gemeint, also die Gestalt- und Formgebung eines Produktes unter mehr oder weniger ästhetischen Gesichtspunkten.

schen den einzelnen Konstrukteuren und Berechnungsingenieuren ablaufen, da die singuläre Optimierung einzelner Bauteile oder -gruppen häufig gegenläufig zur Optimierung des Gesamtprodukts ist. In Abbildung 2-2 ist eine Anforderungspyramide in der Fahrzeugentwicklung dargestellt mit den Interaktionen über die Detaillierungsstufen hinweg. Die breite Basis bilden die Komponenten mit ihrer Vielzahl von Anforderungen, darüber die Baugruppen, die als neue Einheit zusätzliche Anforderungen erfüllen müssen, und an der Spitze das Gesamtfahrzeug mit den Anforderungen, die an das Gesamtprodukt Automobil gestellt werden. Jede Stufe schließt die darunter liegende ein, so dass sich eine pyramidale Zuspitzung mit steigendem Integrationsgrad ergibt.

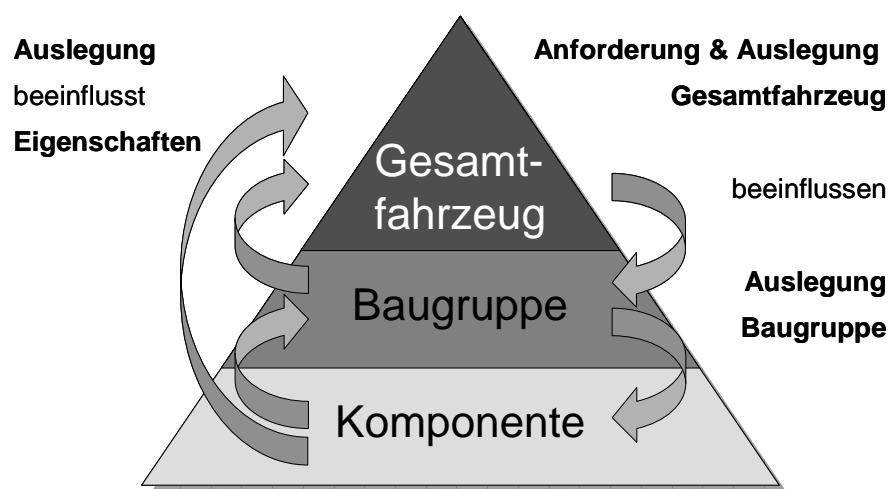


Abbildung 2-2: Gegenseitige Beeinflussung von Anforderungen über die verschiedenen Detaillierungsstufen in der Fahrzeugentwicklung

Die Karosserie ist einer Vielzahl von Anforderungen ausgesetzt, von denen nur ein Teil mit numerischen Simulationsverfahren abgedeckt wird. Viele Anforderungen wie z. B. Ergonomie, Haptik, optische Anforderungen, Qualitäts- und Fertigungsanforderungen werden z. T. mit virtuellen Techniken wie Virtual Reality, z. T. aber immer noch ausschließlich mit funktionalen Prototypen entwickelt und beurteilt. Die Auslegung der Bauteile und -gruppen geschieht mittels Simulation auf allen Ebenen der Produktstruktur, von Gesamtfahrzeugeigenschaften wie Crash, Akustik, Strömung zu spezifischen Komponenteneigenschaften wie Steifigkeiten oder Missbrauchsanforderungen. Die besondere Schwierigkeit und Herausforderung für den Karosserieentwickler, also die Ingenieure aus der Konstruktion und der Simulation, besteht darin, hier einen optimalen Kompromiss zu finden, der die lokalen Eigenschaften berücksichtigt, ohne die globalen Anforderungen zu vernachlässigen.

2.1.2 Charakteristika des Karosserieentwicklungsprozesses

Der Entwicklungsprozess der Karosserie ist geprägt von hoher Arbeitsteiligkeit zwischen OEM-eigenen Entwicklern, Lieferanten und Ingenieur-Dienstleistern. Allein bei einem OEM sind in der Karosserieentwicklung ca. 400 Konstrukteure und etwa 100 Berechnungsingenieure für die Karosseriedisziplinen beschäftigt⁹, von den Gesamtbeschäftigten der Deutschen Automobilindustrie ist nach aktuellen Zahlen des VDA [2006A] jeder neunte Arbeitsplatz in der Forschung und Entwicklung. Zwar arbeiten nicht alle gleichzeitig an demselben Fahrzeug, aber durch die Zunahme der Modelle (siehe Abbildung 1-6) nimmt der Zwang zu Synergien zwischen den Fahrzeugen im Sinne von Plattformstrategien zu, so dass hier modellübergreifende Zusammenarbeit gefordert ist. In der Konzeptphase, in der die grobe Struktur der Rohkarosserie und die wesentlichen Maße der Ausstattung definiert und in einem Iterationsprozess zwischen den Konzeptentwicklern und den späteren Serienentwicklern der Karosserie festgelegt werden, findet noch viel Arbeit beim OEM intern statt, in der Serienentwicklung steigt die Einbindung der Dienstleister und Lieferanten sehr stark an, was einen hohen Anspruch bzgl. Koordinationsleistung bedeutet. Im Rahmen einer Analyse zur Arbeitsweise des Concurrent Engineering (CE) in der Automobilindustrie stellen SAPAUN ET AL [2006] fest, dass die Werkzeuge wie z. B. FEM-Analyse und Methoden wie z. B. FMEA des CE in der Automobilindustrie für erhebliche Verbesserungen hinsichtlich Time-to-Market, Kosteneinsparung und Qualitätsverbesserungen beitragen. Die Umsetzung in der Praxis geschieht in Simultaneous-Engineering-Teams, in denen alle Prozessbeteiligten in der Serienentwicklung (Musterbau, Produktionsplanung, Qualitätssicherung, Vertrieb, Kundendienst und Marketing, teilweise auch Lieferanten) eingebunden werden [EHRENSPIEL 2003], wobei die SE-Teams in der Karosserieentwicklung meist von der Konstruktion geführt werden, die Simulation ist selten eingebunden (siehe auch 3.1.1). Die Abstimmung zwischen den Prozessbeteiligten übernimmt hier meist der Konstrukteur, der letztlich auch die Bauteilverantwortung bzgl. Kosten, Qualität und Funktion hat und dabei von der Simulation und dem Versuch unterstützt wird. Der Karosseriekonstrukteur steht im Mittelpunkt des Produktentwicklungsprozesses und hat eine Vielzahl von Schnittstellen zu berücksichtigen, wie in Abbildung 2-3 nach GRABNER & NOTHHAFT [2002] dargestellt ist. Ergänzend dazu ist das Design als wesentlicher Partner der Karosserieentwicklung zu nennen, das die Form und Gestaltung der Karosserie im Zusammenspiel mit der Technik definiert [OSTLE 2000]. Beteiligt sind dabei das Exterieur-Design, das auch oft als die Königsdisziplin des Designs dargestellt wird [OSTLE 2000], sowie das Interieur-Design, das als unmittelbare Schnittstelle zum Menschen stark an Bedeutung gewonnen hat [SCHARF 1999]. Der Karosseriekonstrukteur steht somit im ständigen Spannungsfeld zwischen den technischen auf der einen und den ästhetischen Anforderungen auf der anderen Seite. Verschärft wird dieser Konflikt noch durch die unterschiedlichen Prozesse von Design und Konstruktion: während der Formfindungsprozess relativ früh im Prozess abgeschlossen ist, geht die Konstruktion ab diesem Zeitpunkt erst in die Detaillierung, so dass

⁹ Die Zahlen schwanken sehr stark und hängen auch davon ab, wie viel bei den OEM in der Entwicklung in Eigenleistung durchgeführt wird. Verlässliche Zahlen aus der Literatur gibt es nicht, so dass hier eine Schätzung des Autors basierend auf Erfahrungen aus der Automobilindustrie als ausreichend gelten muss.

sich hier zwangsläufig Zielkonflikte ergeben, die erst spät oder teilweise gar nicht mehr aufgelöst werden können [OSTLE 2000].

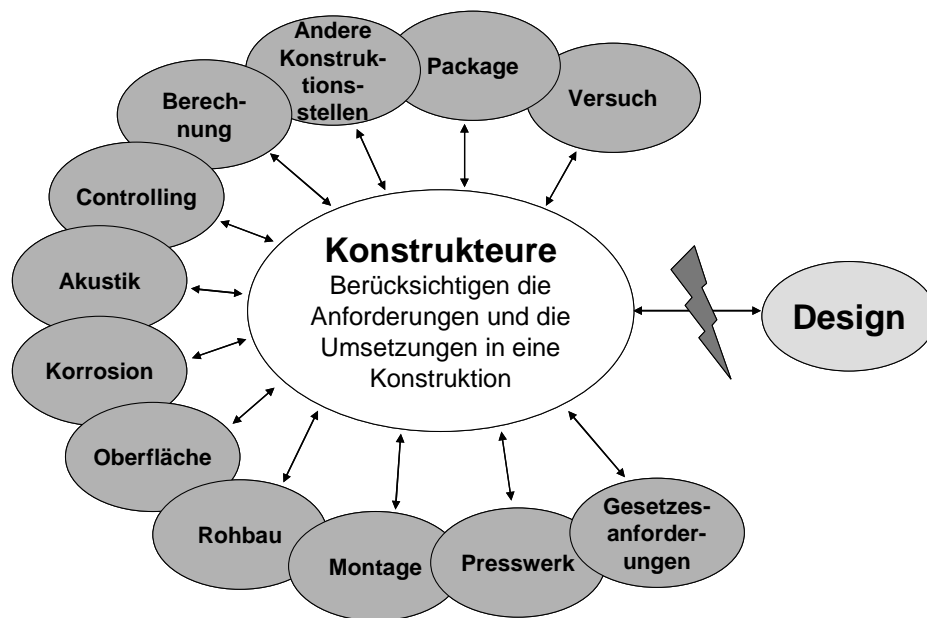


Abbildung 2-3: Einflussgrößen auf den Karosseriekonstrukteur [NACH GRABNER & NOTHHAFT 2002]

Die numerische Simulation in der Karosserieentwicklung deckt die Disziplinen NVH (Noise-Vibration-Harshness), Crash, Insassen- und Fußgängerschutz sowie Strömungssimulation (innen und außen) auf Gesamtfahrzeug bzw. Baugruppenniveau sowie diverse Bauteilfunktionen wie Steifigkeit, Betriebsfestigkeit, etc. ab. Damit leistet die Simulation in der Karosserieentwicklung einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Gesamtfahrzeugeigenschaften und besitzt hier eine zentrale Integrationsfunktion, die über die Karosserie hinausgeht und die Bereiche Aggregate¹⁰, Fahrwerks- und Elektrik-/Elektronikentwicklung mit einschließt. Charakteristisch für den Simulationsprozess in den frühen Phasen ist die weitgehende Unabhängigkeit von der Konstruktion, d. h. die Geometriefestlegung und -auslegung passiert vorwiegend in der Simulation, während in der Serienentwicklung die Konstruktionsabteilungen die Geometrie in Form von CAD-Daten liefern und die Simulation diese überprüft und optimiert. Dabei fällt nach wie vor ein zeitlich hoher Aufwand für die Vernetzung und Erstellung eines Modells der Karosserie und die Adaption für die verschiedenen Berechnungsdisziplinen an. Dennoch wird mit dem Blick auf Abbildung 2-4 schnell klar, dass die Simulation in der Fahrzeugentwicklung mit dem Versuch als bestimmende Auslegungsmethode gleichgezogen hat

¹⁰ Unter den Aggregaten wird üblicherweise die Einheit Motor und Getriebe mit den notwendigen Anbauteilen verstanden. Für die Karosserieentwicklung und -auslegung haben die Aggregate in allen Disziplinen eine überragende Bedeutung.

und in ihrer Bedeutung aufgrund der Kostenvorteile weiter wachsen wird. Bedingt durch die steigende Hard- und Softwareleistung hat die Zahl der Simulationen stark zugenommen, die Kosten für physische Prototypen steigen aber linear an [GRUBER ET AL 2005].

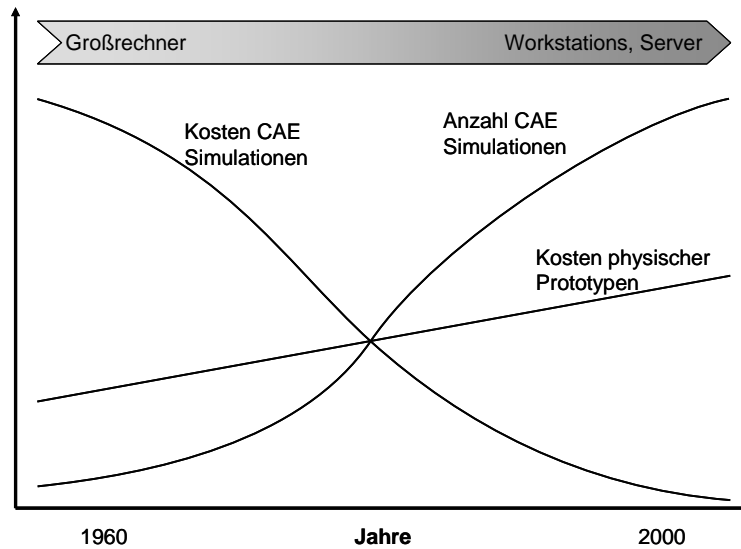


Abbildung 2-4: Kostenvergleich zwischen virtuellen und physischen Prototypen [GRUBER ET AL 2005]

Dies hat dazu geführt, dass sich die Entwicklungsprozesse in der Automobilindustrie fundamental verändert haben: die Iterationszyklen sind wesentlich kürzer und häufiger, aber vorwiegend virtuell. Nach KOJIMA [2000] lässt sich mit Unterstützung der Simulation für die relevanten Fahrzeugeigenschaften die Zahl der Iterationsschritte mit der Evaluierung von Prototypen deutlich reduzieren. In naher Zukunft lässt sich dies sogar auf einen Schritt, d. h. eine physische Baustufe reduzieren bzw. bei einigen Fahrzeugen, beispielsweise Plattformfahrzeugen, kann vollständig auf Prototypen verzichtet werden¹¹, vgl. Kapitel 1.1.2. In Abbildung 2-5 ist der Entwicklungsprozess eines Fahrzeuges mit seinen wesentlichen Meilensteinen nach KOJIMA [2000] dargestellt und die Reduzierung auf einen Prototypenmeilenstein als Validierungsinstrument bzw. als Entwicklungsbestätigung zu erkennen. Besonderes Merkmal dabei ist, dass die hauptsächliche Auslegung in Iterationszyklen zwischen Konstruktion und Simulation geschieht, was die überragende Bedeutung der Integration für die Fahrzeugentwicklung unterstreicht.

¹¹ Dabei sei der Hinweis gestattet, dass zwar auf Prototypen, die für Gesamtfahrzeugversuche notwendig sind, verzichtet werden kann, Versuche für Subsysteme aber nach wie vor notwendig sind, auch als Eingangsdaten für die Berechnung.

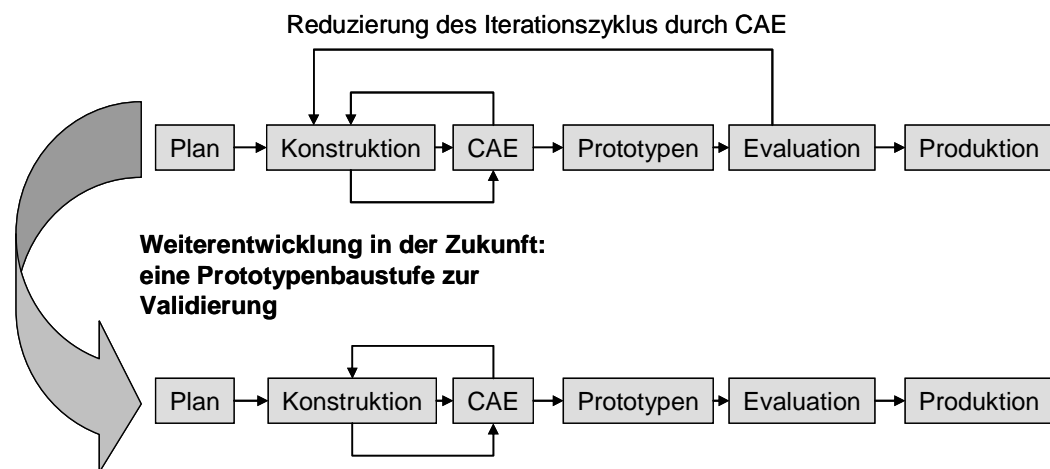


Abbildung 2-5: Reduzierung der Iterationsschritte in der Fahrzeugentwicklung durch CAE-Unterstützung [KOJIMA 2000]

Die Rolle von Simulation und Konstruktion ist in Abbildung 2-6 dargestellt: in der Pre-CAD-Phase, d. h. in der Phase, in der die CAD-Daten gar nicht oder nur in mangelhafter Reife vorliegen, ist die Simulation Treiber für die Konstruktion. Die funktionale Produktreife wächst in der Konzeptentwicklung rapide an, die Aktualität der Daten für die Simulation ist das wichtigste Augenmerk, besonders die geometrische Festlegung besitzt noch viele Freiheitsgrade. In der Serienentwicklung ist vor allem die Vergleichbarkeit der Rechenmodelle wichtig, der funktionale Reifegrad nähert sich nur noch langsam dem Ideal-Zustand von 100% an. Nach DEUBZER ET AL [2005B] sind komplexe Produkte deutlich anfälliger für späte Änderungen und erreichen 100% ihrer Produktreife erst nach dem SOP (Start of Production – der Beginn der Serienfertigung). Die Geometriespielräume in der Serienentwicklungsphase sind auf Grund des Projektfortschritts und der eingefrorenen Randbedingungen, wie z. B. das Produktdesign, gering. Spät in der Entwicklung bilden wegen der kostspieligen Werkzeugfertigung und -änderung nur noch Änderungen der Parameter (Wandstärken, Materialien) Handlungsspielraum für Berechnung und Konstruktion. In dieser Phase ist die Konstruktion der Treiber des Geschehens, da die Gesamtverantwortung im SE-Prozess typischerweise bei der Konstruktion liegt, wie oben gezeigt wurde. SAPAUN ET AL [2006] schätzen die Rolle der FEM-Methode speziell in frühen Phasen der Entwicklung als zu gering ein, da sie eine FEM-Analyse für zu aufwendig halten, dies ist jedoch durch moderne parametrische Geometrieersteller (siehe Kapitel 2.3.6) für die Grundauslegung des Produktes nicht mehr gültig.

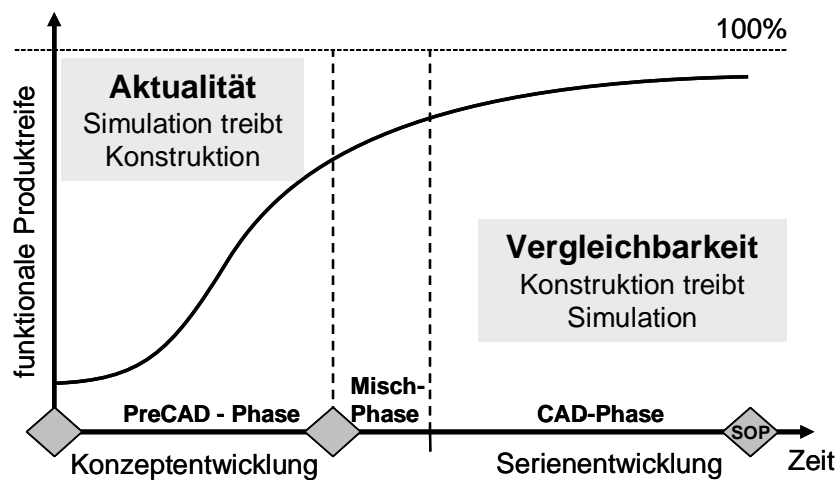


Abbildung 2-6: Rolle von Konstruktion und Simulation über dem Entwicklungsprozess

2.2 Virtuelle Produktentwicklung

Wesentliche Säulen der virtuellen Produktentwicklung sind die 3D-CAD-Konstruktion und die Berechnung von mechanischen Konstruktionen mit CAE-Systemen, die in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt wurden. Die Leistungsfähigkeit der CAx-Systeme hat beständig zugenommen, die Entwicklung von komplexen Produkten mit dem herrschenden Zeit- und Kostendruck wäre ohne die Werkzeuge der virtuellen Produktentwicklung nicht mehr möglich. Die Kenntnis der CAx-Systeme ist die Voraussetzung für eine nachhaltige Integration von Gestaltung und Berechnung und sie legt die Grundlage für das Verständnis der in Kapitel 2.3 vorgestellten Integrationsansätze.

Um ein Verständnis für die Problematik der Integration von Gestaltung und Berechnung zu schaffen, werden im folgenden Abschnitt die Grundlagen der CAx-Technik und der unterstützenden Systeme vorgestellt. Um eine nachhaltige und durchgängige Vernetzung der Konstruktion und der Berechnung zu erreichen, ist eine Integration der Werkzeuge nach wie vor von hoher Bedeutung. Auf diesem Gebiet existieren auch die meisten Forschungsergebnisse, da hier meist der Schwerpunkt der Forschungsprojekte in den vergangenen Jahren lag (vgl. Kapitel 2.3).

2.2.1 Rechnerunterstützte Konstruktion

Die Konstruktion mit 3D-CAD-Systemen ist in der Industrie fest etabliert, die Systeme haben einen hohen technischen Stand erreicht, der sich durch eine konsequente 3D-

Volumenorientierung, Featuretechnologie, parametrische Konstruktion und die Verwendung einer einheitlichen Datenbasis bzw. der Integration verschiedener Applikationen auszeichnet [LÖFFEL 1997]. GERBINO & BRONDI [2004] betonen, dass das CAD-System bzw. das daraus entstehende CAD-Geometriemodell die Basis bildet für die Folgeprozesse der virtuellen Entwicklung mit den Werkzeugen FEM- oder MK-Simulation, Virtual Reality, CAM, etc. In der Konsequenz bedeutet das, dass das CAD-Modell im Mittelpunkt der virtuellen Entwicklung steht und als Wurzel eine entscheidende Rolle für die Entwicklungsqualität spielt. Inzwischen dienen die CAD-Systeme nicht nur zur reinen Geometrieerzeugung, sondern sind in ihren Funktionalitäten deutlich erweitert worden. Die meisten 3D-CAD-Systeme verfügen u. a. über Simulationsmöglichkeiten, DMU-Funktionalitäten, Wissensmanagement-Ansätze und spezifische Konstruktionsumgebungen für Komponenten bzw. Baugruppen. Für die Zusammenarbeit mit der Simulation haben besonders die parametrische Konstruktion und die Featuretechnologie an Bedeutung gewonnen, auch für flächenorientierte Konstruktionen wie z. B. Karosserien und Ausstattung. Für die Integration von Konstruktion und Berechnung sind sie von besonderem Interesse, da hier die größten Potentiale hinsichtlich eines durchgängigen Informations- und Datenflusses liegen.

Parametrische-assoziative Konstruktion

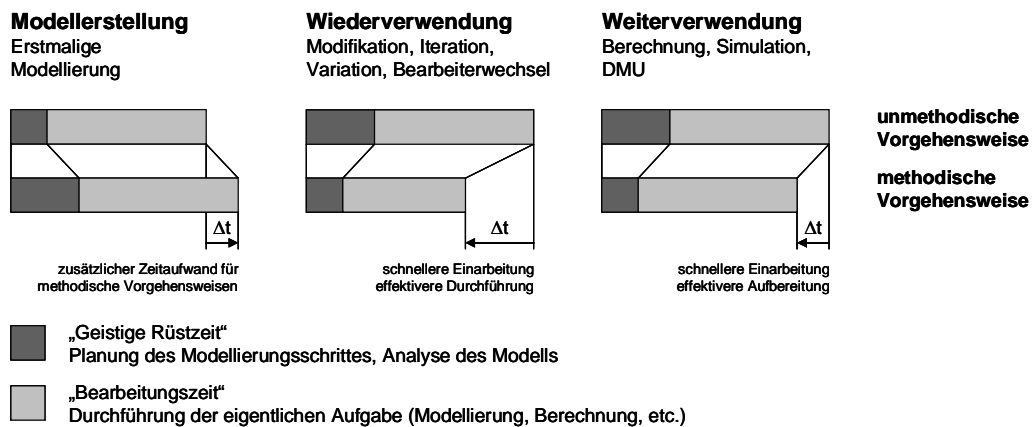
Moderne Entwicklungsprozesse verlangen von den Entwicklern schnelle Reaktionen auf Änderungen, sowohl in der Konstruktionsphase als auch im Änderungsprozess einer Vorserienphase. Diese Flexibilität wird in den CAD-Systemen mit parametrisch-assoziativer Konstruktionsweise erreicht, in denen die Geometrie mit variablen Parametern¹² modelliert wird und sich jederzeit durch Neueingabe eines Parameterwertes ändern lässt. Im Unterschied zur Parametrik, die nur innerhalb eines Bauteils bzw. Modells gilt, verbindet die Assoziativität über geometrische oder funktional zusammenhängende Modelle über Links miteinander, so dass die Änderung des einen Modells auch automatisch die Änderung des anderen Bauteils nach sich zieht [BRAB 2005]. MENDGEN [1999] charakterisiert die parametrische Modellierung als ein Verfahren, das es erlaubt, Beziehungen zwischen den Elementen eines Modells zu definieren und aufrecht zu erhalten. Analog dazu werden auf Baugruppenebene Beziehungen zwischen den Einzelteilen aufgebaut, z. B. Kontaktdefinitionen, die die Lage von Bauteilen zueinander festlegen und ebenfalls über den gesamten Konstruktionsprozess aufrecht erhalten werden können.

Die Anwendungen der parametrischen Modellierung waren anfangs sehr stark auf Volumenkörper konzentriert, haben sich aber mittlerweile durch die kommerzielle Weiterverbreitung von Systemen wie Pro/Engineer, CATIA und UniGraphics auch auf den Bereich der Flächenkonstruktion erweitert und dort durchgesetzt. Allerdings ist die Parametrik für Flächenkonstruktionen schwer zu beherrschen, da ein logischer Aufbau der Konstruktion nicht immer so klar ist wie bei Volumenmodellen. Für die IT-Werkzeuge ist die Parametrik eine wesentliche Voraussetzung für die Integration von Konstruktion und Simulation. Die Arbeiten beispielsweise von AMFT [2003], HESSEL [2003] und BOSHOFF [1997] sind konzeptionell ohne Parametrik nicht denkbar, da die entwickelten Methoden und Verfahren zwingend geometrische

¹² Parameter können sowohl geometrische als auch mathematische sein [LÖFFEL 1997].

Parameter im CAD-System ansprechen, die sich dann entsprechend dem Resultat aus der Simulation anpassen und eine neue geometrische Gestalt erzeugen. Nicht nur für die Konstruktion, auch für die Simulation hat die Parametrik an Bedeutung gewonnen, vor allem in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses. Dazu werden Werkzeuge eingesetzt, die einfache Geometrien für eine grobe Vorauslegung erzeugen können, um die Ergebnisse dann an die Konstruktion für eine optimale Startkonfiguration zurückspielen zu können. Die Geometrie wird mit einfachen Elementen, wie z. B. Punkten, Linien, Balken, etc., erzeugt und kann durch Parametervariation schnell angepasst werden. Die erzeugte Geometrie kann dann vernetzt und berechnet werden. Die Netz-Geometrie und deren Parameter sind nach dem aktuellen Stand nicht assoziativ zum CAD-Modell in der Konstruktion, so dass Systeme wie beispielsweise SFE-Concept eher in der Simulation und dort für die frühen Phasen der Entwicklung für eine grobe Auslegung eingesetzt werden (siehe Kapitel 2.3.6).

Wesentlicher Vorteil der parametrischen-assoziativen Konstruktionsmethode ist die Zeiterparnis bei Modifikation der Bauteile. Eine methodische Konstruktion der Bauteile vorausgesetzt können sich nach MENDGEN [1999] wesentliche Effekte hinsichtlich Zeitersparnis in der Entwicklung ergeben, ja nach Anzahl der erforderlichen Änderungsschleifen steigt der Effekt. Abbildung 2-7 verdeutlicht den Effekt, besonders bei Entwicklungen mit intensiver Simulationsstätigkeit, die häufige Änderungen nach sich ziehen. Es sei an dieser Stelle jedoch angemerkt, dass sich in der Literatur und in der Industrie bei komplexen Produkten kein schlüssiger Beweis für die Effektivität und tatsächliche Effizienzsteigerung der parametrisch-assoziativen Konstruktionsweise finden lässt. Zumal wenn es sich um topologisch sehr aufwendige Änderungen handelt, ist eine Neukonstruktion oftmals einfacher und schneller als eine Änderung der parametrisch aufgebauten Modelle. Vorteile ergeben sich dann ohne Zweifel in der Serienentwicklung, wenn die Änderungen eher klein sind und nicht die grundsätzliche Gestalt des Bauteils betreffen. Nach TECKLENBURG [2004] sind 57% aller Konstruktionen im Entwicklungsprozess Anpassungskonstruktionen und 23% Variantenkonstruktionen, so dass die parametrisch-assoziative Konstruktionsweise hier ein breites Anwendungsgebiet findet.



Kumulierung der Effekte im Produktentwicklungszyklus

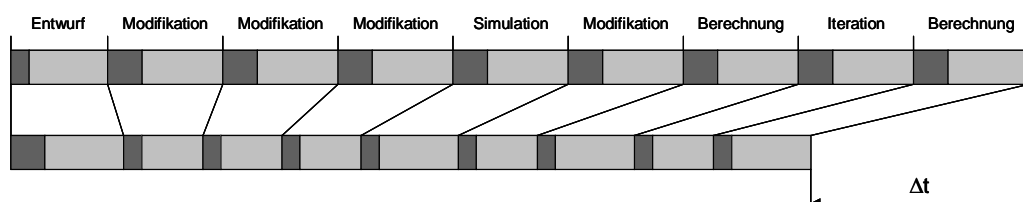


Abbildung 2-7: Zeiteinsparung mit parametrisch-assoziativer Konstruktion [MENDGEN 1999]

Featuretechnologie im CAD

Eng verknüpft mit der Parametrik ist die Feature-Technologie, die mit der Einführung von parametrischen CAD-Systemen immer stärker an Bedeutung gewinnt. Für die Definition eines Features existieren in der Literatur zahlreiche Ansätze, die sich z. T. unterscheiden, so dass an dieser Stelle einige gängige Beschreibungen genannt werden. Ein Feature ist nach SPUR & KRAUSE [1997] definiert als Form-Feature, beispielsweise Verrundungen von Flächen, mit oder ohne Semantik, die zum Beispiel in Form von Regeln angelegt sein kann. Diese Definition findet sich in erweiterter Form auch in der VDI-RICHTLINIE 2218 [2003] zur Feature-Technologie wieder, in der ein Feature eine Aggregation von Eigenschaften eines Produktes beschreibt, wobei die Beschreibung die relevanten Eigenschaften selbst, deren Werte sowie deren Relationen und Zwangsbedingungen beinhaltet. Die Featuretechnologie stellt eine bedeutende Erweiterung der CAx-Technologie dar, vom rein geometrisch-orientierten hin zu einem informations- und bedarfsgesteuerten Konstruktionsprozess [BINDE 2003]. Grundgedanke der Featuretechnologie ist dabei, komplexe Produkte in einfache Elemente (Features) zu zerlegen und mit deutlich mehr Informationen zu versehen als die reine Geometrie [MENDGEN 1998].

Features in modernen CAD-Systemen sind bislang eher geometrieorientiert und beinhalten wenig weitere Informationen. Zur optimalen Nutzung der Feature-Technologie sollten Features neben den geometrischen aber vor allem technologische, funktionale und organisatorische Aspekte enthalten, so dass der Konstrukteur im Konstruktionsprozess über einen Vorrat an vordefinierten konstruktiven Elementen verfügt, die er im Laufe der Bauteilentstehung zusammensetzen kann. In Abbildung 2-8 sind die Inhalte von semantisch hochwertigen Elementen nach WARTZACK & MEERKAMM [1999] dargestellt. Ziel ist es, dass die nachfolgenden Glieder in der Prozesskette die jeweiligen Produktdaten rechnerunterstützt weiterverarbeiten können, beispielsweise in der Simulation. Einige Ansätze zur Integration von Konstruktion und Simulation basieren auf der Featuretechnologie, siehe dazu Kapitel 2.3.5.

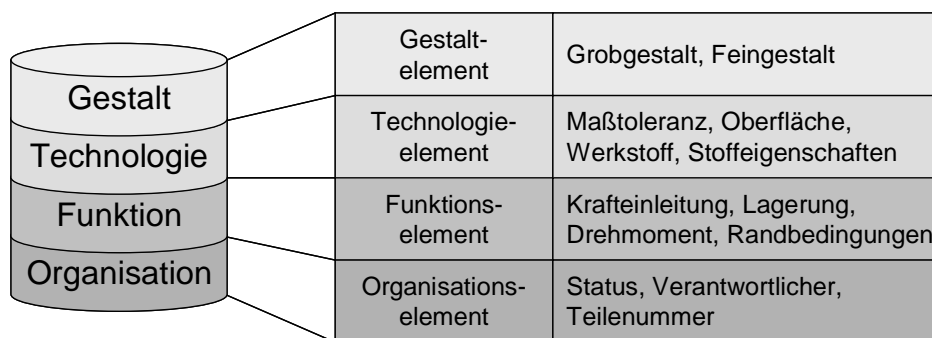


Abbildung 2-8: Inhalte von Features [WARTZACK & MEERKAMM 1999]

2.2.2 Simulationsverfahren im Produktentwicklungsprozess

Systematik und Klassifizierung der Simulationsmethoden

Unter dem Begriff CAE wird die Anwendung von Berechnungsmethoden und Simulationsverfahren zur Auslegung und Optimierung von Konstruktionen mit Rechnerunterstützung verstanden [SPUR & KRAUSE 1997]. Die Begriffsdefinitionen von Simulation und Berechnung sind dabei keineswegs einheitlich, teils werden sie als Synonyme verwendet, teils werden unterschiedliche Anwendungen darunter verstanden. BÄR [1998] schlägt eine Definition vor, die im Rahmen der Arbeit Anwendung findet, nach der unter Simulation das bewusst initiierte und reproduzierbare Nachbilden eines technischen Systems mithilfe von Modellen verstanden wird, wobei die Modelle materieller oder immaterieller Art sein können, das Original repräsentieren und so einen bestimmten Zweck erreichen sollen. Abbildung 2-9 zeigt eine Einteilung der Simulation in drei Klassen, jeweils mit und ohne Rechnerunterstützung nach BÄR [1998].

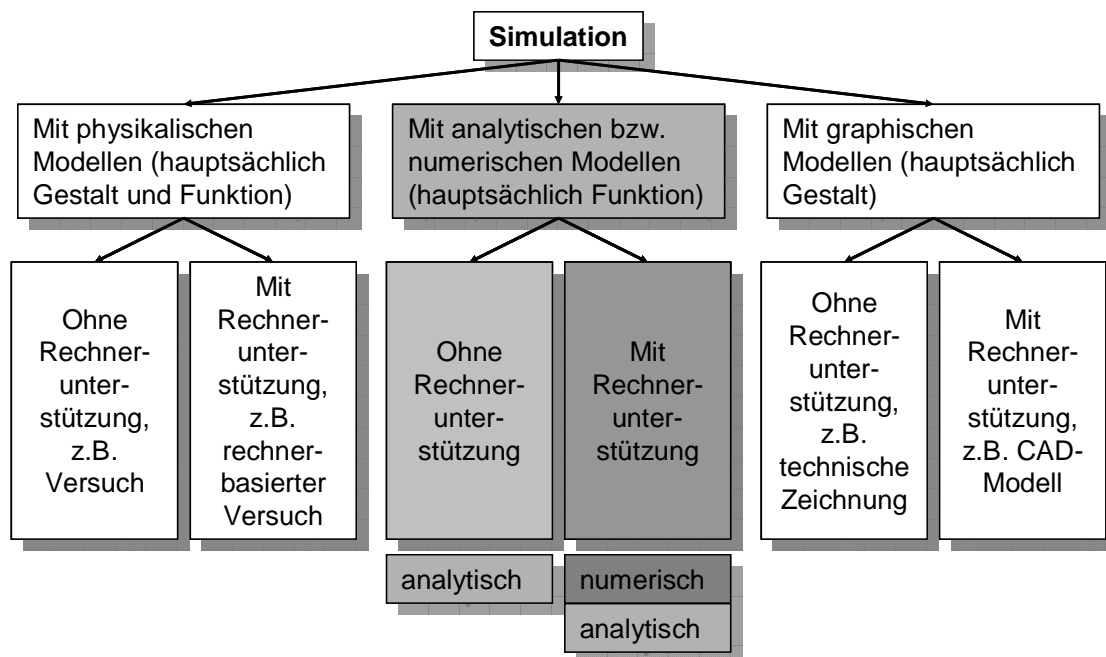


Abbildung 2-9: Systematik der Simulation nach BÄR [1998]

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Integration der numerischen Simulationsverfahren mit Rechnerunterstützung, die Simulation mit graphischen und physikalischen Modellen liegt außerhalb der definierten Systemgrenze und findet keine Berücksichtigung. Analytische Verfahren mit Methoden der Mechanik decken nur einen sehr kleinen Teil der Anwendungsfälle ab und sind in ihren Einsatzmöglichkeiten limitiert, so dass sie ebenfalls ausgeklammert werden. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass nach dem aktuellen Stand der Technik die Validierung von Simulationsmodellen mit Versuchen nach wie vor sehr wichtig ist, weil dabei überprüft werden kann, wie gut die Modellbildung im Rechner auch eine Abbildung des realen Verhaltens eines Produktes darstellt. Abgesehen davon gibt es, wie oben bereits erwähnt, trotz gesteigener Rechnerleistung Beanspruchungen von Produkten, die nicht oder nur sehr unzureichend simuliert werden können, die für die Überprüfung der Eigenschaften eines Produktes aber von hoher Bedeutung sind, z. B. Umwelt- und Klimaeinflüsse, mechanisches Verhalten unter Toleranzeinflüssen, Verschleiß- und Alterungsverhalten, etc. [LINDEMANN 2005A]. Die Simulation ist folglich stets im Spannungsfeld zwischen einer Vereinfachung der Konstruktion im Sinne einer Beschränkung auf das Wesentliche [BÄR 2002] und einer möglichst realen Abbildung des Konstruktionsstandes, um dem realen Verhalten nahe zu kommen und alle möglichen Einflüsse zu berücksichtigen.

Die numerischen Simulationsverfahren sind wiederum unterteilt in verschiedene Anwendungen [BÄR 1998]:

- Mathematikprogramme

- Auswahl- und Dimensionierungsprogramme
- Optimierungsprogramme
- Mehrkörpersimulation (MKS)
- Toleranzanalysen
- Finite-Elemente-Methode (FEM)
- Digital-Mock-Up (DMU)
- Stömungssimulation (CFD)
- Spritzgießsimulation
- Randelement-/Finite-Differenzen-Methode (REM/FDM)
- Betriebsfestigkeitsnachweis

Für die Anforderungen an eine Fahrzeugkarosserie mit Berücksichtigung von Gesamtfahrzeugeigenschaften sind in erster Linie FEM, MKS, CFD und DMU von Bedeutung. MKS wird vorwiegend im Bereich der Fahrwerksentwicklung eingesetzt, CFD für die Strömungssimulation im Bereich Außenströmung (Aerodynamik) und Klimatisierung bzw. Aggregatekühlung. Beide Verfahren decken bestimmte spezifische Anforderungen an die Karosserie ab und die Ergebnisse der Simulationen werden im Entwicklungsprozess berücksichtigt, sind aber nicht der Haupttreiber der Karosserieauslegung. DMU wird meist von der Konstruktion gesteuert und z. T. auch verantwortet bzw. selbst durchgeführt, so dass sich eine Integration in den Konstruktionsprozess an dieser Stelle erübrigt, da der DMU-Prozess bereits integraler Bestandteil des Prozesses darstellt, um die geometrische Stimmigkeit von Produkten sicherzustellen. Die überwiegende Zahl der Lastfälle in der Produktentwicklung von komplexen Produkten wird mit der FEM simuliert, in der Fahrzeugentwicklung lassen sich die Lastfälle grob unterteilen in Fahrzeugsicherheit mit Crash, Insassen- und Fußgängerschutz, NVH (Noise - Vibration – Harshness) mit Festigkeit, Steifigkeit lokal und global, Schwingungskomfort und Akustik. Integrationsmethoden zwischen Konstruktion und Simulation, die auf dem Gebiet der FEM erarbeitet werden, lassen sich in ihren Grundprinzipien auch auf andere numerische Simulationen übertragen.

Numerische Simulation mit FEM

Der Ablauf einer FEM-Berechnung¹³ teilt sich in Preprocessing, Solving und Postprocessing, wobei für die drei Teilschritte unterschiedliche Systeme verwendet werden. Dazu kommt, dass für unterschiedliche Problemstellungen oft auch unterschiedliche Solver verwendet werden, je nachdem ob es sich um Crash-, NVH- oder Insassenschutzlastfälle handelt. Der Systemlandschaft auf der CAD-Seite mit einem zentralen CAD-System steht auf der Berech-

¹³ Auf eine theoretische Einführung in die Methode der Finiten Elemente wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf die umfangreiche Literatur auf diesem Gebiet verwiesen (vgl. STEINBUCH [1998], DUBBEL [2002]).

nungsseite meist eine Vielzahl von Systemen gegenüber, was eine Integration nicht fördert. Im Folgenden werden die Teilschritte des FEM-Berechnungsprozesses mit ihren wesentlichen Merkmalen und Tätigkeiten kurz beschrieben, um einen Einblick in die Komplexität der Systemlandschaft in der Simulation zu geben.

Preprocessing:

Im ersten Schritt der FE-Simulation wird das Modell aufgebaut, was trotz moderner IT-Systeme nach wie vor ein sehr zeitraubender Vorgang ist und in einem Preprocessing-System durchgeführt wird. Die CAD-Daten werden entweder von der Konstruktion oder in frühen Phasen der Entwicklung von der Berechnung selbst mithilfe von parametrischen CAD-Systemen (siehe 2.1.1.1) erzeugt, um eine Grobauslegung beginnen zu können. Bevor die Vernetzung beginnen kann, muss die CAD-Geometrie bereinigt werden, d. h. Flächen einheitlich ausrichten, Unstetigkeiten im Flächenverbund beseitigen, überflüssige Geometrielemente¹⁴ weglassen, z. B. kleine Löcher, Verrundungen, etc. und ggf. die Mittelflächen von dünnwandigen Blechstrukturen erzeugen. Anschließend wird das FE-Netz für die Bauteile erzeugt, das Modell aufgebaut, d. h. die Bauteilverbindungen wie Schweißpunkte, Klebeverbindungen, usw. modelliert, die Randbedingungen angegeben, z. B. Dummy- und Barrierepositionen für Crashlastfälle und als letzter Schritt wird den Bauteilen ein Werkstoff zugewiesen, wobei die Berechnung hier meist selbst auswählt und die Empfehlung nach erfolgter Simulation dann an die Konstruktion zurückspielt, die dann die technische Umsetzbarkeit überprüft. Ergebnis des Preprocessings ist ein rechenfähiges CAE-Modell in Form eines Input-Decks, eine ASCII-Datei, in der alle Informationen enthalten sind, die für die Durchführung der eigentlichen Berechnung notwendig sind. Der Aufwand für die Modellerstellung ist sehr hoch, die komplette Vernetzung und Modellierung eines Fahrzeugmodells für Crash- bzw. Steifigkeitslastfälle kann je nach Ausgangsbasis und Projektfortschritt bis zu acht Wochen dauern. Dabei gilt zu beachten, dass die Güte der Ergebnisse sehr stark von der Qualität des Modells abhängig ist.

Solving:

Die Solver als die zentralen Systeme der FE-Simulation führen die eigentliche Berechnung durch. Eingangsdaten sind die Input-Files, das Ergebnis die Output-Files, die mithilfe des Postprozessors ausgewertet werden. Je nach Problemstellung variieren die Rechenzeiten und die Verlässlichkeit der Ergebnisse, handelt es sich um linear-statische oder um komplexe dynamische nichtlineare Probleme [SPUR & KRAUSE 1997]. Abhängig von der Problemstellung haben sich unterschiedliche Solver für die unterschiedlichen Klassen von Berechnungen herausgebildet, die alle ihre spezifischen Stärken- und Schwächen-Profile haben.

Postprocessing:

Postprozessoren übersetzen die Ergebnisse des Solvers in Form von Verschiebungen, Spannungen, etc. in interpretierbare und darstellbare Ergebnisse [SPUR & KRAUSE 1997]. Typische Darstellungsmöglichkeiten sind Spannungsfelder, Verformungen, Eigenformen, zeitliche Verformungsanalysen und Temperatur- bzw. Geschwindigkeitsverläufe. Zum Teil läuft das

¹⁴ Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass die Vereinfachung der Geometrie sehr stark vom Lastfall abhängig ist und mit steigender Rechnerleistung nicht mehr die entscheidende Rolle spielt.

Postprocessing bereits teilautomatisiert ab, wie in Abbildung 2-10 nach GRUBER ET AL [2005] dargestellt. Dabei sind das Solving, die Speicherung in der Datenbasis und die Erstellung der Berichte automatisiert.

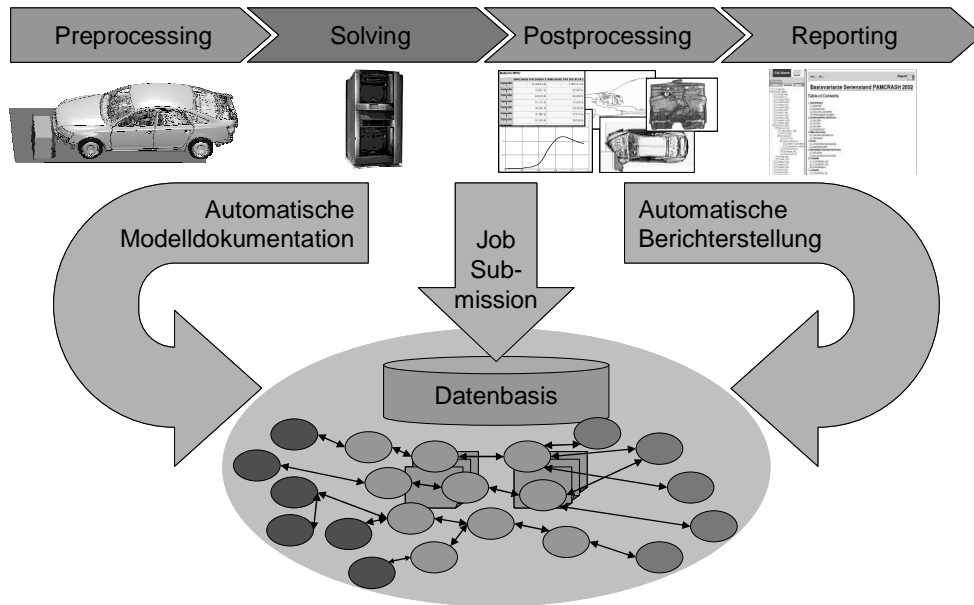


Abbildung 2-10: Teilautomatisiertes Postprocessing [NACH GRUBER ET AL 2005]

Der Prozess ist von vielen Brüchen, d. h. der Konvertierung von Daten in andere Formate bzw. der Weiternutzung in anderen IT-Systemen, und damit Schnittstellen gekennzeichnet und wird zusätzlich durch die Vielzahl von CAE-Systemen im Pre-, Postprocessing und Solving erschwert, die sich meist durch die gewachsenen IT-Strukturen in den Unternehmen einerseits und andererseits an den Vorlieben der Anwender bzw. ihren jeweiligen Stärken und Schwächen orientieren. Dadurch wird deutlich, dass eine Integration von CAD- und CAE-Systemen eine besondere Herausforderung an die Systemlandschaft stellt und sich an dieser Stelle die Frage stellt, ob eine Vernetzung von Systemen und Datenstrukturen der einzige und richtige Weg zu einer Vernetzung von Konstruktion und Simulation sein kann. Auch eine weitere Automatisierung des Simulationsablaufes durch Workflows, wie in Abbildung 2-10 dargestellt, bringt noch keinen Fortschritt in der CAD-CAE-Integration, sondern macht die Simulation schneller und einfacher für die Anwender.

2.2.3 Grundlagen zur Speicherung, Verwaltung und Austausch von Daten

Produktdatenmanagement und PDM-Systeme

Bei der Suche nach einer einheitlichen Definition für „Produktdatenmanagement“ und „PDM-Systeme“, stößt man auf eine Vielzahl unterschiedlicher Meinungen und Bezeichnungen. Neben „PDM“ existieren weitere Namen für Systeme, die grundsätzlich alle dasselbe Ziel verfolgen: die Verwaltung aller Daten und Prozesse, die während des gesamten Produktlebenszyklus entstehen [REINHART & MILBERG 1996]. Nach der VDI-RICHTLINIE 2219 [1999] werden im deutschen Sprachraum „Produktdatenmanagement (PDM)“ und „Engineering Data Management (EDM)“ mit der gleichen Bedeutung verwendet wie „Product Data Management“ im englischen Sprachraum. Weitere Synonyme sind nach KARCHER & BENDER [2001], SCHÖTTNER [1999] und der VDI-RICHTLINIE 2219 [1999] zum Beispiel die folgenden Bezeichnungen: CMS (Configuration Management System), EDB (Engineering Database), TDM (Technical Data Management oder Team Data Management) und TMS (Technical Management System). In Forschung und Lehre wird oft sehr allgemein von einem Ansatz, alle anfallenden Produkt- und Anlagendaten zentral zu speichern, zu verwalten und wieder bereitzustellen, gesprochen [ZÄH & REINHART 2003]. Nach ANDERL [2002] ist PDM auf die bei der Produktentwicklung und -modifizierung entstehenden Produkt- und Prozessinformationen fokussiert, woraus sich der Geltungsbereich von PDM nach KARCHER & BENDER [2001] ableitet: Produktdatenmanagement bezeichnet die ganzheitliche, strukturierte und konsistente Verwaltung aller Daten, Dokumente und Prozesse, die bei der Entwicklung neuer oder der Modifizierung bestehender Produkte über den gesamten Produktlebenszyklus generiert, benötigt und weitergeleitet werden müssen. Damit grenzt sich PDM ab von den in letzten Jahren aufgekommenen Begriffen wie PLM (Product Lifecycle Management) und PDC (Product Definition and Commerce), die sowohl eine größere Integrationstiefe als auch -breite über den Lebenszyklus des Produkts hinweg besitzen. Abbildung 2-11 nach EIGNER & STELZER [2001] zeigt den erweiterten Funktionsumfang von PLM und PDC gegenüber PDM und damit gleichzeitig den Trend im Datenmanagement, der nicht mehr nur auf die Entwicklung, sondern auf den kompletten Produktlebenszyklus fokussiert ist. Aktuell sind die Produktdatenmanagementsysteme noch nicht in der Lage, sämtliche im Laufe des Produktlebenszyklus entstehenden Daten, die sich in Produkt- und Prozessdaten aufteilen, zu handhaben. Produktdaten sind dabei Stamm- und Strukturdaten, die die Eigenschaften und die Varianten und Versionen abbilden, Prozessdaten hingegen beschreiben technische und organisatorische Prozesse, die das Produkt in seinen Abhängigkeiten durchläuft und steuert und verwaltet aktiv Arbeitsabläufe, die somit jederzeit nachvollziehbar werden [FZI 2004].

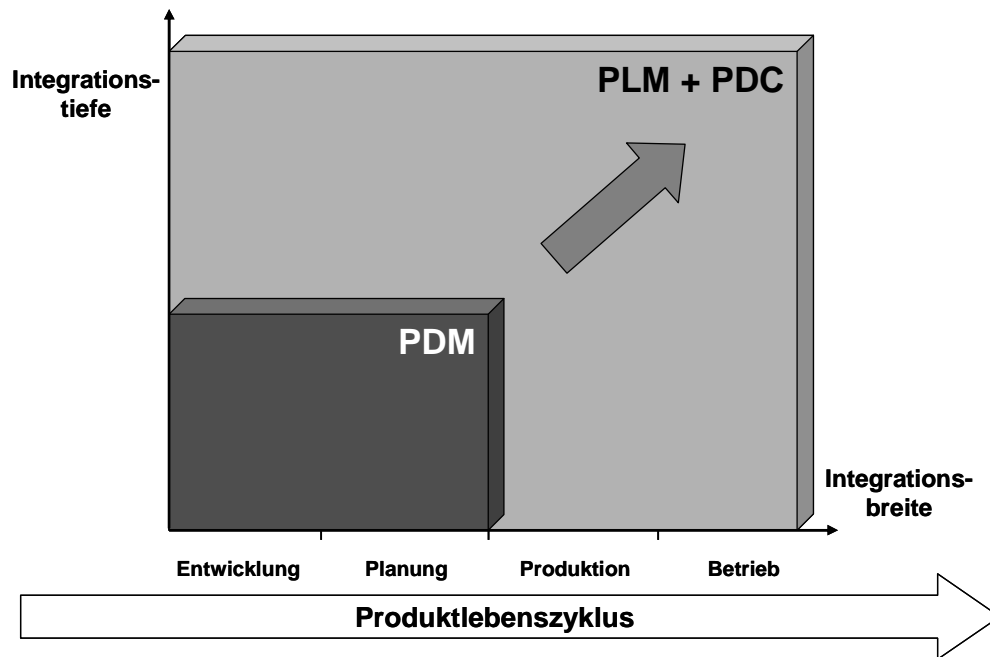


Abbildung 2-11: Erweiterter Funktionsumfang von PLM und PDC gegenüber PDM [EIGNER & STELZER 2001]

Über die Kernfunktionen von PDM-Systemen herrscht in der Literatur weitgehend Einigkeit [EIGNER & STELZER 2001, SCHÖTTNER 1999, KARCHER & BENDER 2001, VDI-RICHTLINIE 2219 1999]. Diese seien aus Anwendungs- und Handhabungssicht kurz dargestellt, die oft sehr weitgehenden Administrations- und Konfigurationsfunktionen werden nicht berücksichtigt:

- Dokumenten- und Datenmanagement: Verwaltung von Stammdaten und der dazugehörigen Dokumente
- Produktstrukturmanagement: Verwaltung von Versionen und Varianten des Produkts
- Freigabe¹⁵- und Änderungsmanagement
- Schnittstellen und Input-Output-Management: regelt den Datenaustausch mit den Anwendungsprogrammen

Darüber hinaus stellen größere PDM-Systeme noch einige erweiterte Funktionen zur Verfügung:

¹⁵ Mit der Freigabe wird nach abschließender Prüfung die Nutzung von Dokumenten genehmigt. Dabei kann die Freigabe in mehreren Stufen erfolgen [DIN 6789 1990]. Im Kontext der Arbeit heißt das, dass Komponentendaten zur weiteren Nutzung in der Prozesskette freigegeben werden, z. B. um Werkzeuge damit zu konstruieren.

- Workflow- und Prozessmanagement (siehe Kapitel 2.3.3)
- Projektmanagement zur Unterstützung und Planung einmaliger Arbeiten
- Viewing/DMU, Redlining und Sichtenmanagement zur schnellen Informationsbeschaffung

In der industriellen Praxis sind die PDM-Systeme teilweise gewachsene und firmeneigene Systeme mit beschränkten Funktionalitäten und eingeschränkter Flexibilität, teils Systeme von kommerziellen Anbietern, die dann zwar meist flexibler und anpassungsfähiger sind, oft aber nur bedingt in die IT-Infrastruktur eines Unternehmens passen.

Datenformate und Schnittstellen

Im Entwicklungsprozess werden Daten von unterschiedlichen Personen mit unterschiedlichen Anwendungen bearbeitet und gespeichert. Zur Ermöglichung des Datenaustausches ist der Ex- und Import von Daten notwendig, die in den jeweiligen Anwendungsprogrammen als Schnittstellen implementiert sind. Die Aufgaben von Schnittstellen zwischen CAD-Systemen sind nach DYLA [2002]:

- Informationsaustausch
- Konsistente Abbildung externer Informationen auf systeminterne Schnittstellen
- Benutzerfreundliche Anwendung
- Fehlersicherheit und -behebung
- Anpassbarkeit an anwendungsspezifische Anforderungen

Die Datenformate werden in zwei Klassen eingeteilt, nämlich native und neutrale Datenformate. Native Formate sind herstellereigentlich, d. h. die Datenstruktur ist kein offener gelegter Allgmeinstandard und meist nur dem Softwarehersteller bekannt. Neutrale Datenformate hingegen sind in ihrer Struktur offen und frei verwendbar. Beispiele dafür sind IGES (Initial Graphics Exchange Specifications) und VDA-FS (Verband der Automobilindustrie - Flächenschnittstelle), die vorwiegend für die Automobilindustrie für Anwendungen zum Austausch von Karosserie- und Gussteilen entwickelt wurde. Eine leistungsfähige Schnittstelle, STEP (Standard for the Exchange of Product Data) nach der ISO10303-1 [1994] soll nach und nach alle anderen Schnittstellenformate ablösen und kann aufgrund des Produktmodellcharakters nicht nur Geometriedaten, sondern auch eine Vielzahl anderer Daten übertragen, die nicht geometrischer Art sind. Bedeutende Nachteile von STEP sind nach KLEMENT [2005], dass es nicht möglich ist, bestimmte Problemstellungen komplett zu beschreiben und dass funktionale Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Bauteilen nicht erfasst werden können.

Für den Datenaustausch gibt es nach BÄR [1998] grundsätzlich drei Möglichkeiten, die in Abbildung 2-12 dargestellt sind:

- Definition eines systemneutralen Datenformats mit wenig Prozessoren für die Konvertierung, jedoch abhängig von der Leistungsfähigkeit der beteiligten Systeme

- Direkte Konvertierung, die ein Maximum an Informationen übertragen kann, aber mit steigender Anzahl an beteiligten Systemen auch eine steigende Anzahl an Konvertern bedeutet
- Definition eines einheitlichen Datenformats, auf das alle beteiligten Systeme zugreifen können

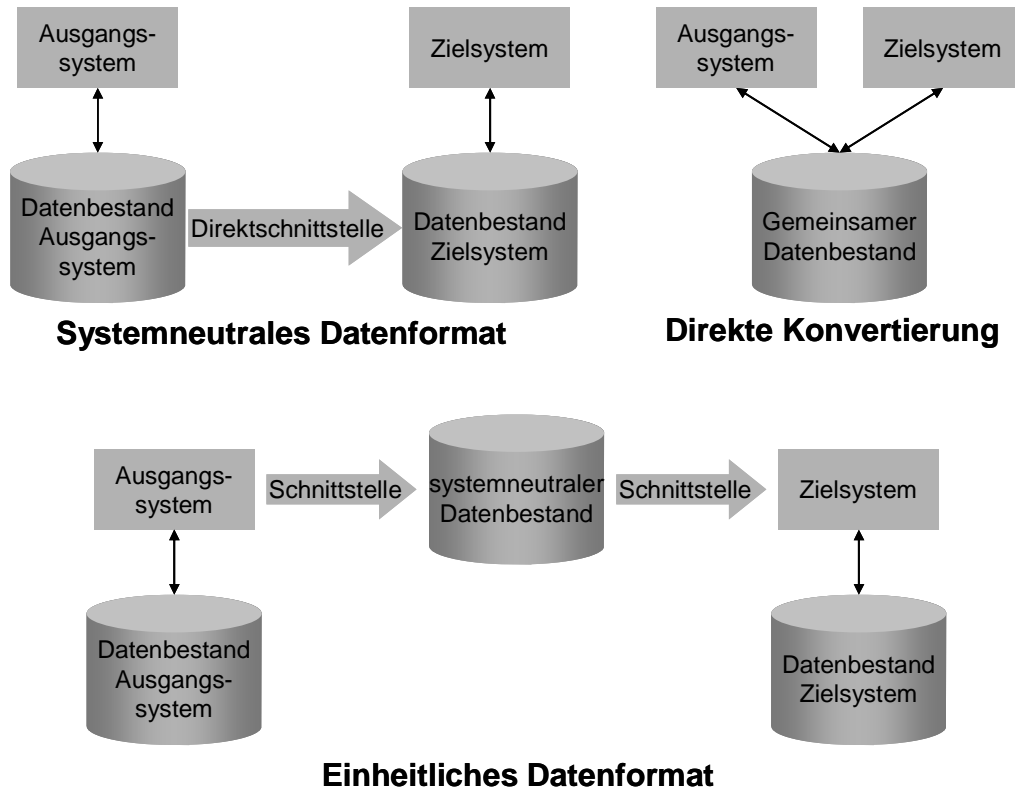


Abbildung 2-12: Möglichkeiten des Datenaustausches [BÄR 1998]

Aus Abbildung 2-12 in Kombination mit Abbildung 2-7 und der Heterogenität der Systeme in der Simulation wird auch ersichtlich, worin die Schwierigkeiten der datentechnischen Integration von Konstruktion und Simulation für komplexe Produkte liegen. Die vielen beteiligten kommerziellen CAx-Systeme mit den nativen Datenformaten in Kombination mit den im iterativen Konstruktionsprozess entstehenden Versionen der Produktdaten degradieren den Konstruktions- und Simulationsingenieur immer mehr zum Datenlogistiker, der schwerpunktmäßig mit der Suche und Konvertierung von Daten beschäftigt ist.

Workflows

Als Workflows werden Prozesse definiert, die automatisiert und organisiert ablaufen und sowohl menschliche (manuelle) als auch automatisierte Aufgaben beinhalten [MELNIK 1997].

Ein Workflow ist eine Aktivität, die eine koordinierte Ausführung von mehreren Aufgaben (Tasks) einbezieht, die von verschiedenen Verarbeitungsentitäten bearbeitet werden, welche Ausführungsinstanzen umfassen, beispielsweise Menschen, Computersysteme und Applikationen. Workflows unterscheiden sich durch den Grad ihrer Arbeitsteiligkeit, Komplexität, Strukturierung und Detaillierung.

Workflows können nach folgenden Typen klassifiziert werden: administrative, kollaborative, Ad-hoc und Produktions-Workflows, ihre Einordnung nach Wertschöpfung, Wiederholungsrate sowie Komplexität und Struktur der Aufgabe sind in Abbildung 2-13 dargestellt [SCHNEIDER 2003]. Auffällig dabei ist, dass die Workflows sich sehr stark auf administrative und Bereiche der Produktion konzentrieren, die Produktentwicklung selbst spielt noch eine eher untergeordnete Rolle.

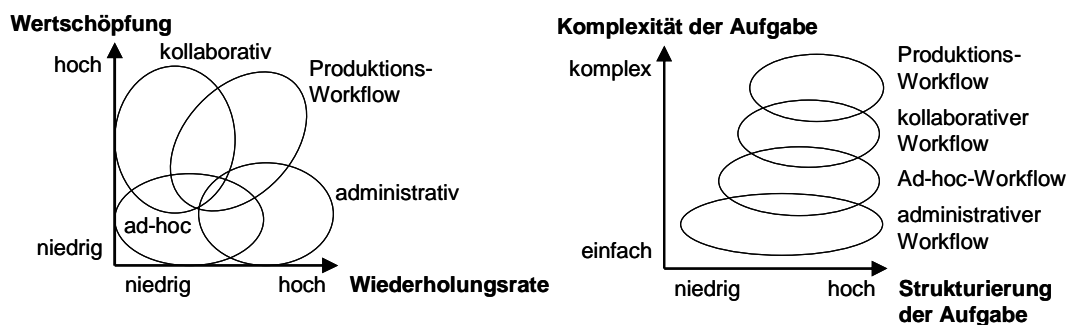


Abbildung 2-13: Klassifikation von Workflows [SCHNEIDER 2003]

Die systemseitigen Voraussetzungen für Workflows werden üblicherweise mit Workflowmanagementsystemen (WFMS) geschaffen, die die einzelnen Aktivitäten innerhalb eines Workflows koordinieren und synchronisieren [MÜLLER & STOLP 1999]. Dabei muss das WFMS die für die jeweiligen Vorgänge benötigten Anwendungen zur Verfügung stellen. In der Integration von Konstruktion und Simulation spielt das Workflowmanagement eine große Rolle zur (Teil-)Automatisierung von Prozessschritten, speziell in der Simulation, wie zahlreiche Veröffentlichungen auf diesem Gebiet belegen [SCHUMACHER ET AL 2002, SAUTER ET AL 2003], in denen Prozessschritte in der Topologieoptimierung mittels Workflows automatisiert werden.

Produktmodell

Ein Konzept zur Integration verschiedenster Teilprozesse und -daten in der Produktenstehung ist das Produktmodell¹⁶. Ziel ist es, in allen Phasen des Produktentwicklungsprozesses eine

¹⁶ In der Literatur existieren zahlreiche Definitionen des Begriffes Produktmodell, die sich alle mehr oder weniger unterscheiden. Im Kontext der Arbeit ist von dem integrierten Produktmodell die Rede, welches formalisiert ist und somit eine rechnergestützte Bearbeitung erlaubt [GÜNZLER 2005].

vollständige und effiziente Rechnerunterstützung zu gewährleisten [BÄR 1998] und den beteiligten Entwicklern eine spezifische Sicht auf das Produkt zu ermöglichen. Die im Laufe des Produktlebenszyklus anfallenden Produktdaten werden in einem Produktmodell abgelegt, werden nur einmal erzeugt, sind nicht redundant und stets auf dem aktuellen Stand [EHRLENSPIEL 2003]. Bestandteil des Produktmodells sind beispielsweise Produktstrukturen und -geometrien, graphische Darstellungen, technologische Informationen, Kosteninformationen und Fertigungspläne [SPUR & KRAUSE 1997]. Um eine solche Flut von Informationen und Daten sinnvoll handhaben zu können, wird das Produktmodell in Partialmodelle zerlegt. Abbildung 2-14 zeigt das Konzept des segmentierten totalen Produktmodells nach SPUR & KRAUSE [1997]: zentrales Element ist die Produktstruktur, die die verschiedenen externen und internen Modelle integriert. Dabei beschreiben die internen Modelle die einzelnen Phasen der Produktentwicklung, während die externen Modelle allgemeine Informationen im Kontext des Produktes und zur Prozesssteuerung bereitstellen [BÖHME 2004].

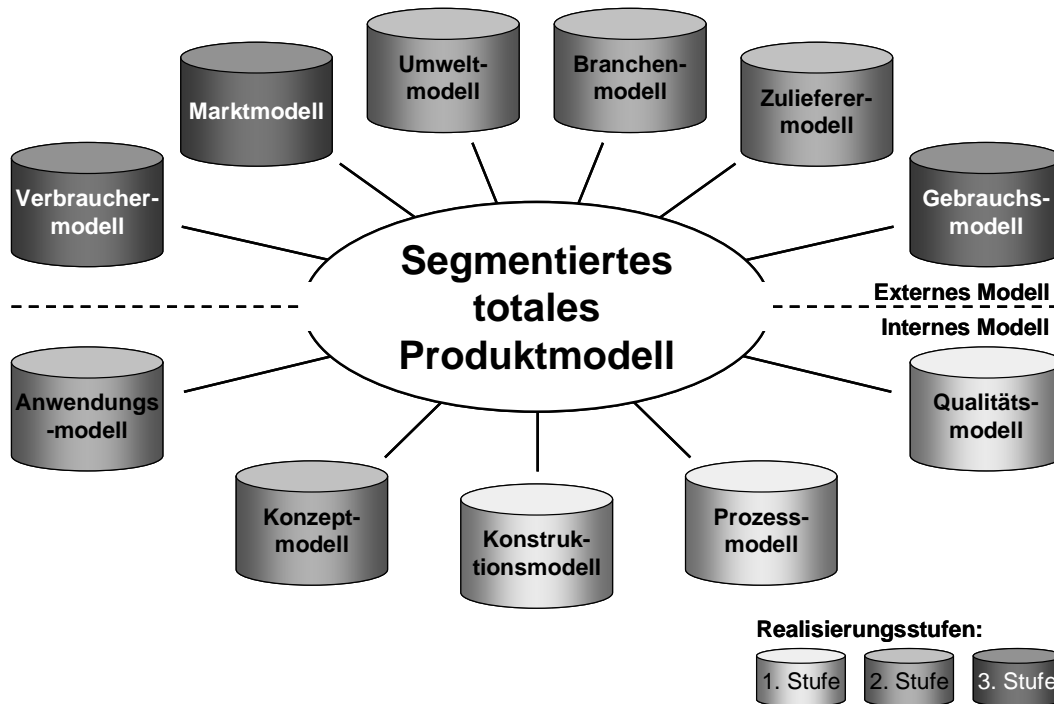


Abbildung 2-14: Segmentiertes totales Produktmodell [SPUR & KRAUSE 1997]

Eine Möglichkeit zur partiellen Realisierung des Produktmodells ist die Entwicklung von STEP, der aktuell jedoch schwerpunktmäßig zum Austausch von Geometriedaten genutzt wird [BÄR 1998]. Nach aktuellem Stand ist eine vollständige Realisierung des Produktmodells trotz vieler Bemühungen nicht in Sicht, es gibt jedoch Ansätze zur Unterstützung der Integration von Konstruktion und Simulation, siehe dazu Kapitel 2.3.3.

2.3 Stand der Forschung und Technik zur Integration von Konstruktion und Simulation in der Produktentwicklung

Im Umfeld der Forschung und Wissenschaft haben umfangreiche Forschungsprojekte intensiv unterschiedlichste Aspekte der virtuellen Werkzeuge und deren Einbindung in die Produktentwicklung betrachtet. Die wichtigsten und für die Arbeit relevanten Ansätze werden in diesem Abschnitt kurz vorgestellt und analysiert, wobei es sich vorwiegend um Ansätze aus dem Bereich der Informationstechnologie handelt¹⁷. Die starke Konzentration auf die IT-Probleme im Zusammenspiel zwischen Konstruktion und Simulation rührt daher, dass die Soft- und Hardwareentwicklungen die bestimmenden Einflussgrößen der virtuellen Produktentwicklung waren und sich dadurch die Annahme gefestigt hat, eine Vielzahl an Probleme ließe sich durch bessere IT-Konzepte alleine lösen. Dies ist aber als großer Fehler zu betrachten, eine Integration von Teilprozessen muss alle relevanten Einflussgrößen einbeziehen, siehe dazu Kapitel 3.2. Dazu kommt, dass die IT-Systeme immer stärker spezialisiert werden und für bestimmte Probleme maßgeschneiderte Software generiert wird [BURR ET AL 2003]. Der Stand der Technik zur Integration von Konstruktion und Simulation beschränkt sich folglich sehr stark auf die entwickelten IT-Lösungen, die für bestimmte Prozesse und Problemstellungen adaptiert wurden. Die wichtigsten und für die Arbeit relevanten Ansätze aus der Fülle der Forschungsarbeiten werden im Folgenden dargestellt.

2.3.1 Prozessanalyse zwischen Konstruktion und Simulation

Prozessmodelle und Vorgehensweisen zur Integration von Simulation in den Entwicklungsprozess

In der Literatur und Forschung sind die verschiedensten Vorgehens- und Prozessmodelle¹⁸ zur Modellierung von Entwicklungsabläufen zu finden, zu nennen sind beispielsweise der Vorgehenszyklus nach EHRENSPIEL [2003], der Problemlösezyklus nach DAENZER & HUBER [2002], das Münchner Vorgehensmodell (MVM) nach LINDEMANN [2007] und viele mehr. Dabei ist festzustellen, dass es sich um sehr allgemeine Modelle handelt, ein speziell auf Konstruktion und Simulation abgestimmtes Modell ist aktuell nicht zu finden. Einige Modelle berücksichtigen jedoch bereits die Simulation und deren Integration in den Konstruktionsprozess explizit und auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

¹⁷ Der vorgestellte Stand der Forschung und Technik kann aufgrund der Fülle des vorliegenden Materials keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Es werden daher die Ansätze vorgestellt, die für den weiteren Verlauf der Arbeit und für das Verständnis des Problems und der daraus abgeleiteten Handlungsfelder eine hohe Relevanz besitzen.

¹⁸ Vorgehensmodelle bilden wichtige Elemente einer Handlungsfolge ab, die als Hilfsmittel zum Planen und Kontrollieren von Prozessen dienen [LINDEMANN 2007] und bieten in kritischen Situationen ein systematisches Vorgehen zur Problemlösung [BADKE-SCHAUB ET AL 2004].

2.3.1.1.1 VDI-RICHTLINIE 2221 [1993] und daraus abgeleitete Modelle

Das in der VDI-RICHTLINIE 2221 [1993] vorgestellte Vorgehensmodell des methodischen Entwickelns und Konstruierens mit seinen sieben definierten Aufgabenumfängen wird von WÖLFLE [1998] um die charakteristischen Berechnungsaktivitäten erweitert. Bereits in der frühen Phase der Aufgabenklärung und Erstellung der Anforderungsliste werden Überschlagsrechnungen vorgeschlagen, die mit fortschreitender Anforderungsdetaillierung in Auslegungsrechnungen übergehen. Nach dem Vorentwurf der Konstruktion betrachtet er die Berechnung als Nachrechnung für die Erfüllung der Anforderungen, die mit zunehmendem Projektfortschritt und somit steigender Reife der Konstruktion schließlich hauptsächlich der Optimierung der Konstruktion dienen soll. Als Konsequenz daraus schlägt WÖLFLE [1998] ein ABC-Konzept vor, mit dem Berechnungs- und Bewertungsmethoden nach Zeit- und Aussagegüte klassifiziert werden, so dass der Konstrukteur phasen- und problemabhängig das jeweils sinnvolle und effiziente Berechnungsverfahren auswählen kann.

PAHL & BEITZ [2003] gehen einen Schritt weiter und ergänzen den Vorgehensplan nach der VDI-RICHTLINIE 2221 [1993] um eine durchgängige Rechnerunterstützung. So führen sie in den Prozessablauf einen CAD-Bereich ein, mit dem sie das Produktmodell (PM), den Editor (ED), die Operationsmethoden (OM) sowie den Daten- und Wissensspeicher (DW) beschreiben (vgl. Abbildung 2-15), um so Informationsbrücken und Vernetzungen zwischen den einzelnen Arbeitsschritten zu schaffen und damit die einzelnen Arbeitsplätze untereinander zu verbinden. Hauptmerkmal dieses Ablaufs ist eine durchgängige Protokollierung der Ergebnisse mit dem Wunsch, ein wissensbasiertes System (Expertensystem) für eine spätere Wiederverwendung zu erstellen. Auch wenn ein solches Ablaufsystem für unterschiedliche Produkte flexibel anwendbar ist, sehen PAHL & BEITZ [2003] es als erforderlich an, jeweils ein unternehmens- bzw. produktprogrammspezifisches System aufzubauen, was nur die benötigten Arbeitsschritte und Module enthält. Voraussetzung für solche eine Umsetzung ist das Vorhandensein eines rechnerinternen Produktmodells, dessen Praxistauglichkeit in Form einer durchgängigen Umsetzung nach wie vor aussteht, von Operationsmethoden für die durchgängigen Bewertungs- und Simulationsschritte, ein leistungsfähiges Datenverwaltungssystem sowie flexible Benutzerschnittstellen.



Abbildung 2-15: Vorgehensplan nach der VDI-RICHTLINIE 2221 [1993] mit Erweiterungen nach PAHL & BEITZ [2003]

2.3.1.1.2 Erweitertes Prozessmodell nach SCHLACHT [2001]

SCHLACHT [2001] löst sich weiter von dem bisher vorgestellten Vorgehensplan nach der VDI RICHTLINIE 2221 [1993] und dessen Abwandlungen und Ergänzungen. Die Gliederung der Entwicklung ist zwar ähnlich aufgebaut und teilt sich in Problemstellung, Konzeptphase, Entwurfsphase und Bearbeitungsphase, wie in Abbildung 2-16 dargestellt, berücksichtigt jedoch wesentlich mehr die Einbindung der Simulation in den Entwicklungsablauf. Seine Arbeit bezieht sich dabei auf ein biomechanisches, hybrides System, nämlich die Entwicklung eines Crash-Dummies für die Fahrzeugsicherheit, daher ist sein Prozessmodell für das gewählte Produktbeispiel in Form einer Fahrzeugkarosserie von besonderem Interesse. Ausgehend von seiner speziellen und angepassten Prozessformulierung wird im Folgenden ein daraus abgeleitetes, allgemeiner gültiges Entwicklungsschema aufgebaut.

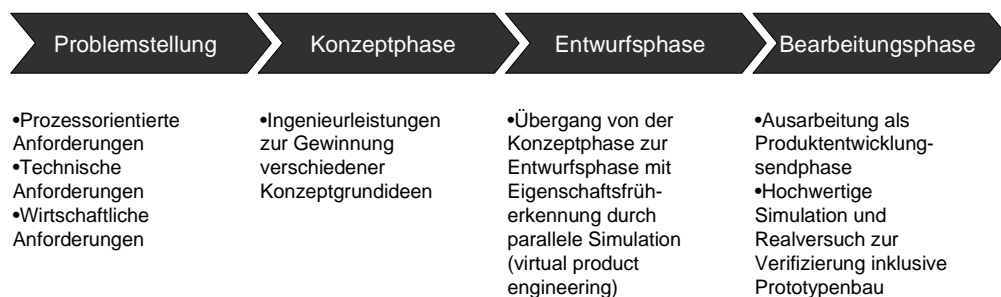


Abbildung 2-16: Vier-Phasen-Modell nach SCHLACHT [2001]

In der Phase der Problemstellung werden Hilfsmittel für die Umsetzung der prinzipiellen und qualitativen Funktion gefunden. Für die Prüfung der Produkteigenschaften durch Simulationen ist eine Identifizierung der Kernfunktionen unumgänglich. Das Ergebnis dieser Phase sind Konzepte, die als prinzipielle Lösung in Frage kommen und die wichtigsten Anforderungen erfüllen können. In der nächsten Phase des Prozesses, der Konzeptphase müssen die wichtigsten Punkte erarbeitet und in einer Anforderungsliste berücksichtigt werden. Bereits hier wird erkennbar, ob die erarbeiteten Grundfunktionskonzepte die Erwartungen und Forderungen erfüllen. Zur Beherrschung der Komplexität der Entwicklungsaufgabe müssen die Funktionen systematisch in Nebenfunktionen strukturiert werden. Mithilfe dieser Gliederung lassen sich bei einer späteren Modellierung für die Rechnerimulation bereits wichtige Erkenntnisse und Wirkungszusammenhänge ablesen. In der Entwurfsphase wird auf Grundlage der Konzeptphase das System modelliert und ausgearbeitet. Numerische Modelle gestatten dabei die Ermittlung von Entwicklungsfortschritten mithilfe der Computersimulation. Diese Vorgehensweise hat gegenüber dem Realversuch den Vorteil, erheblich Zeit und Geld einzusparen. Die eigentliche Modellierung findet in der Regel in mehreren Einzelschritten statt, bei der, ausgehend von einer Spezifizierung des Gesamtprodukts in Baugruppen und Bauteile, das Modell etappenweise aufgebaut wird. Mit der Bearbeitungsphase wird die Konstruktion abgeschlossen. Hier soll weiter die Qualität der Entwicklung bewertet und abgesichert werden und auf Basis dieser Beurteilung Prototypen für eine Validierung der Berechnung und für

Realversuche erstellt werden mit dem Ziel, Planungs- oder Konstruktionsfehler bereits vor Inbetriebnahme möglichst auszuschließen.

2.3.1.1.3 Alternative Prozessmodelle

ALBERS & NOWICKI [2003] und MELCHINGER & SCHMITZ [2003] fordern deutlich die Abkehr vom etablierten klassischen Entwicklungsprozess hin zu einer vollkommenen Integration der Simulation vor allem in den frühen Phasen der Produktentwicklung. Trotz des erhöhten Aufwandes für den Modellaufbau sehen ALBERS & NOWICKI [2003] deutliche zeitliche und finanzielle Einsparpotentiale durch Reduktionen in der Anzahl und bei den Durchlaufzeiten der Iterationsschleifen sowie eine Kostenersparnis beim Prototypenbau durch Eigenschaftsfrüherkennung. So hat nach ALBERS & NOWICKI [2003] im klassischen, phasengegliederten Ablauf der Produktentstehung bisher der Einsatz der Simulation hauptsächlich bei der Suche nach Fehlerursachen eine Bedeutung, womit der Berechnung nur eine äußerst untergeordnete Rolle zukommt. Durch die konsequente Zuordnung von Simulationsverfahren zu den einzelnen Phasen im Entwicklungsprozess, die sich nicht wesentlich von dem Vorgehen nach der VDI-RICHTLINIE 2221 [1993] unterscheiden, lässt sich der klassische, iterative Entwicklungsprozess zu einem mehr parallel orientierten Prozess ausbilden. Die Iterationen werden beschleunigt und es müssen nicht mehr grundlegende Konzepte geändert werden, weil die Lernkurve über die Produkteigenschaften am Anfang des Prozesses einen deutlich höheren Gradienten ausweist, was nebenbei auch zu strafferen und kürzeren Entwicklungszeiten beiträgt.

MELCHINGER & SCHMITZ [2003] stellen die entwicklungsphasenabhängige Anwendung verschiedenster Simulationsmethoden mit dem Ziel einer frühen Absicherung des Entwicklungsprozesses detaillierter dar und teilen den Prozess in die Phasen Konzept, Entwurf, Detaillierung, Prototypenbau, Erprobung, Überarbeitung und den Serieneinsatz ein. Dabei weist er den einzelnen Schritten einen zugeschnittenen Einsatz von Simulationsmethoden zu und beschreibt die Voraussetzungen, die vorhanden sein müssen, um diese sinnvoll einzusetzen. Entscheidend ist, dass durch den kontinuierlichen Einsatz der Simulation über den Entwicklungsprozess das Wissen über das Systemverhalten linear mit wechselnder Steigung wächst, während bei einem kurzzeitigen Einsatz der Simulation zu bestimmten Stufen im Prozess das Wissen linear wächst und dann auf dem erreichten Niveau verbleibt, bis der nächste Prozessschritt zum Systemverhalten ansteht. Da das Modell von MELCHINGER & SCHMITZ [2003] eher auf Produkte des Maschinenbaus fokussiert ist, bedarf der dargestellte zeitabhängige Einsatz der unterschiedlichen Simulationsmethoden ebenso wie die aufgeführten Prozessabschnitte jedoch noch einer firmen- und produktspezifischen Anpassung. Außerdem gilt es stets zu berücksichtigen, dass für den Erfolg der Simulation nicht nur die Verfügbarkeit von technischen Ressourcen entscheidend ist, sondern vor allem die beteiligten Personen, die einerseits über hohes technisches Fachwissen und andererseits über die Fähigkeit, mit den beteiligten Prozesspartnern zu kommunizieren, verfügen müssen, mehr dazu in Kapitel 3.

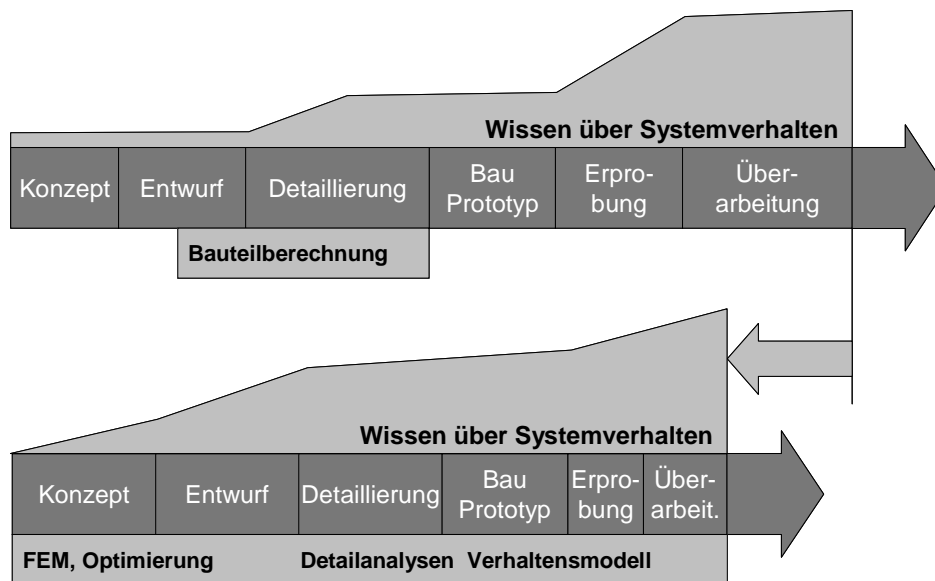


Abbildung 2-17 Klassischer und simulationsintegrierter Entwicklungsprozess [MELCHINGER & SCHMITZ 2003]

MÜHLBAUER [2002] bezieht sich in seinem Prozessmodell auf die Fahrwerksentwicklung im Kontext des Gesamtfahrzeugs. Das Fahrwerk mit seinen Komponenten leistet im Entwicklungsprozess seinen spezifischen Beitrag zur Erreichung der Gesamtfahrzeugziele, die letztendlich für den Endkunden von Bedeutung sind. MÜHLBAUER [2002] geht damit auf den Aspekt ein, dass die Eigenschaften des Gesamtsystems sich stets aus Eigenschaften der Subsysteme ergeben und somit die Subsysteme in Form der Fahrzeugkomponenten ebenfalls einer intensiven Eigenschaftsanalyse und -optimierung unterzogen werden müssen. Dazu werden die Gesamtfahrzeugeigenschaften kaskadierend auf die darunter liegenden Subsysteme heruntergebrochen und anschließend Inkonsistenzen und Zielkonflikte aus den multiplen Funktionsanforderungen identifiziert und auf dieser Basis Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Unterstützung dieses Prozesses und die Auflösung der Grenzen einer herkömmlichen versuchsbasierten Produktentwicklung, wie eine Gesamtoptimierung von Beginn an, können nur mithilfe eines virtuell basierten Entwicklungsprozesses realisiert werden. Dies lässt sich nur durch eine strukturierte Vernetzung aller Simulationsprozesse sowohl untereinander als auch mit anderen beteiligten Entwicklungsprozessen verwirklichen. So bietet eine Integration der Simulation in den Entwicklungsablauf die Möglichkeit, Zieldefinition, Systemauslegung und Eigenschaftsabsicherung weitestgehend parallel ablaufen zu lassen. Hierfür unbedingt erforderlich ist ein klarer und unternehmensweit geltender Prozessablauf, der das interdisziplinäre Zusammenwirken vor dem Hintergrund der gleichzeitigen gestalt- und funktionsorientierten Produktbetrachtung eindeutig regelt. In Abbildung 2-18 ist das V-Modell mit den wichtigsten Prozessschritten, vor allem dem Herunterbrechen von Gesamtfahrzeugzielen auf die unteren Hierarchieebenen der Produktstruktur dargestellt.

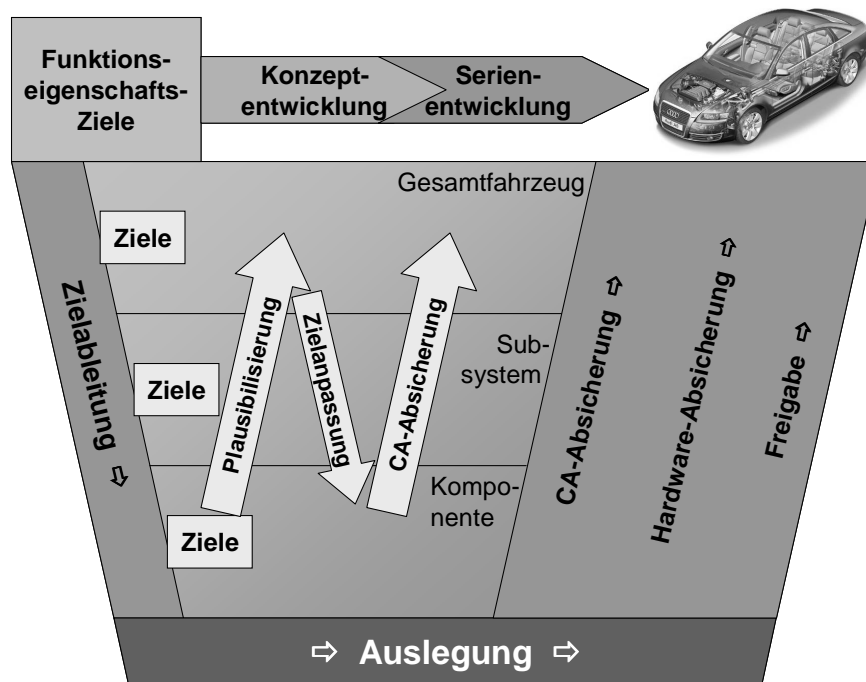


Abbildung 2-18: Virtueller Entwicklungsprozess - V-Modell [MÜHLBAUER 2002]

MÜHLBAUER [2002] zeigt mit seinem Ansatz vor allem das Potential der virtuellen Methoden in den frühen Phasen der Produktentstehung auf. Für eine abschließende Absicherung und Freigabe der Entwicklungsergebnisse hält er Realversuche auch in den kommenden Jahren für unumgänglich.

Das aus der Softwareentwicklung entlehnte V-Modell wird ebenfalls für die Entwicklung mechatronischer Produkte eingesetzt, beschrieben in der VDI-RICHTLINIE 2206 [2004]. Mechatronische Produkte sind eine Integration aus den Ingenieurwissenschaften Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik und müssen folglich ebenfalls Prozesse und Werkzeuge in einer Entwicklung für hochkomplexe Produkte integrieren. In der VDI-RICHTLINIE 2206 [2004] wird für die Entwicklung mechatronischer Produkte ein flexibles Vorgehensmodell vorgeschlagen, das aus folgenden Teilen besteht:

- Problemlösungszyklus auf Mikroebene zur Bearbeitung planbarer und vorhersehbarer Teilaufgaben
- V-Modell als Makrozyklus als Richtschnur für das grundsätzliche Vorgehen
- Prozessbausteine zur Bearbeitung wiederkehrender Teilschritte

Das V-Modell nach der VDI-RICHTLINIE 2206 [2004] mit seinen einzelnen Schritten ist in Abbildung 2-19 dargestellt, von den Anforderungen über den Systementwurf zum Domänen-

spezifischen Entwurf, bei dem getrennt nach den jeweiligen Disziplinen die Lösungskonzepte erarbeitet werden, die im Teilschritt Systemintegration zu einem Gesamtprodukt integriert werden. Dabei muss fortlaufend eine Eigenschaftsabsicherung, z. B. in Form von Berechnungen, durchgeführt werden, die unterstützt werden durch den flankierenden Prozess Modellbildung und -analyse. Bei der Analyse des V-Modells werden die Analogien zur Integration von Konstruktion und Simulation klar: erstens handelt es sich ebenfalls um einen hochintegrativen Prozess, der Spezifika aus verschiedenen Domänen vereinigen muss und zweitens bildet die Integration von Konstruktion und Simulation einen zentralen Schwerpunkt des V-Modells. In der Eigenschaftsabsicherung und der Modellbildung und -analyse müssen Konstruktion und Simulation eng vernetzt zusammenarbeiten, um die Teillösungen aus den einzelnen Domänen zu einem den Anforderungen entsprechenden Produkt zu integrieren.

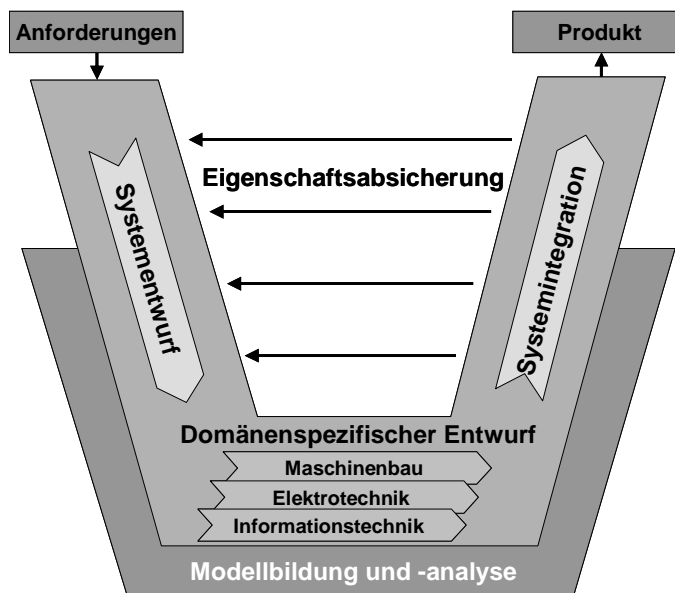


Abbildung 2-19: Vorgehensmodell bei der Entwicklung mechatronischer Produkte nach der VDI-RICHTLINIE 2206 [2004]

2.3.1.1.4 Kritische Auseinandersetzung mit den vorgestellten Prozessmodellen

Die vorliegenden Prozessmodelle orientieren an den Phasen der Produktentwicklung und ordnen die Simulation mit ihren Aktivitäten in den Prozess ein. Naturgemäß ist der Detaillierungsgrad der Modelle sehr gering, es handelt sich um allgemeingültige Vorgehensweisen, die an die jeweilige Entwicklungssituation und vor allem an das Produkt mit seinen spezifischen Ausprägungen angepasst werden müssen. Dabei ergeben sich abhängig von der Komplexität des Produktes sehr komplexe Prozessmodelle, wie in Abbildung 2-20 dargestellt, das eine Prozesslandkarte mittels der eEPK-Methodik zeigt, in dem Teile der Karosserieentwicklung beispielhaft modelliert wurden. Dabei wird schnell klar, worin die Problematik der meisten Prozessmodelle besteht: der Spagat, zwischen einer hohen Allgemeingültigkeit auf der

einen Seite und gleichzeitig Flexibilität, Aussagekraft und Orientierungshilfe für den realen Entwicklungsprozess auf der anderen Seite zu bieten, ist derzeit kaum gegeben. Das dargestellte Prozessmodell entspricht in seiner Komplexität den Verhältnissen der realen Fahrzeugentwicklung, ist aber für einen Einsatz in der Praxis und als Orientierungshilfe für den Entwicklungsingenieur ebenso wenig tauglich wie die allgemeingültigen Prozessmodelle, aus denen es sich ableitet. Besondere Schwierigkeit bei der Modellierung bereitet die Tatsache, dass die einzelnen Vorgänge einen extrem hohen Vernetzungsgrad untereinander aufweisen und daraus ein fast unkontrollierbarer Informations- und Datenfluss entsteht.

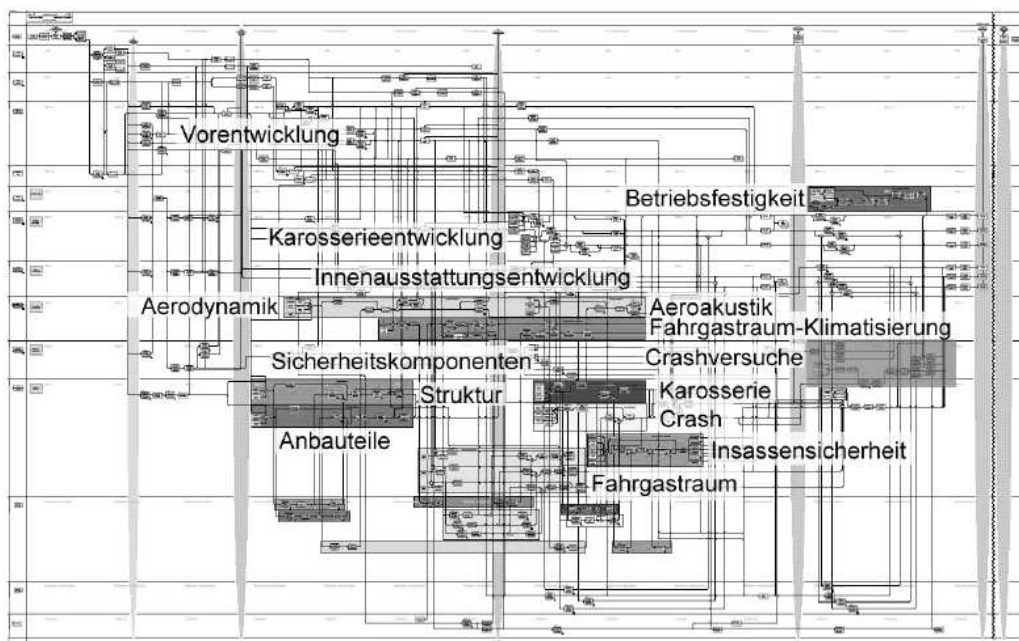


Abbildung 2-20: Prozesslandkarte in der Karosserieentwicklung

An dieser Stelle besteht noch großer Handlungsbedarf in der Entwicklung von Prozess- und Vorgehensmodellen, die die Anforderungen von Konstruktion und Simulation berücksichtigen.

Optimiertes Prozessmodell für die Integration von Konstruktion und Simulation

Ein optimiertes Prozessmodell berücksichtigt die Dynamik und den zeitliche Versatz von Konstruktion und Simulation sowie deren extrem hohe Vernetzung untereinander. Die grundsätzliche Vorgehensweise nach den oben geschilderten Prozessmodellen wird dabei nicht in Frage gestellt, da ihre Gültigkeit und Übertragbarkeit bis zu einem gewissen Grad anerkannt werden. Im Folgenden werden kurz die zwei aus Sicht der Integration von Konstruktion und Simulation wichtigsten Abhängigkeiten der Prozessmodellierung analysiert, die Zeit und die Funktion.

2.3.1.1.5 Komponentenorientierte Prozessmodellierung

Die meisten Prozessmodelle sind an der Reife von Komponenten ausgerichtet, auch wenn sie dies nicht explizit enthalten, so ist doch an den Inhalten der einzelnen Schritte sichtbar, dass die Konstruktion der Komponente im Vordergrund steht. Letztlich bestimmen definierte Meilensteine im Produktenstehungsprozess, wie z. B. der SOP, die Aktivitäten, d. h. Terminpläne und Prozessmodelle in Unternehmen werden nach diesen Terminen ausgerichtet. Dies lässt sich schon daran ermessen, dass die Werkzeuglaufzeiten, also die Herstellung der Produktionsanlagen, um ein Vielfaches länger dauert als die reine Konstruktionszeit. Nach ZEUGTRÄGER [1997] ist die Produktionsphase einer komplexen Montageanlage bis zur Inbetriebnahme mit 29 Wochen fast dreimal so lange wie die Konstruktionsphase mit nur elf Wochen. Die Zeiten lassen sich auf andere technische Produkte übertragen, wengleich sich z. B. im Automobilbau die Größenverhältnisse ändern. Damit wird auch klar, dass letztlich die Produktionszeiten mit Werkzeugerstellung, Aufbau der Montagelinien, etc. bestimmend für die Terminpläne sind.

2.3.1.1.6 Funktional orientierte Prozessmodellierung

Weil Terminpläne und Prozessmodelle selten an Funktionen und Eigenschaften, sondern nach Komponenten ausgerichtet werden, können die Änderungskosten später im Prozess z. T. exorbitant hoch werden, wenn die geforderten Funktionen nicht erfüllt werden, und die Termine dadurch noch kritischer werden, abgesehen von Qualitätsmängeln beim Kunden. Eine Voraussetzung für einen funktional stärker orientierten Entwicklungsprozess ist die Vernetzung der einzelnen Funktionsauslegungen und -absicherungen untereinander, so dass klare Daten- und Informationsflüsse entstehen, die wiederum eindeutige Verantwortlichkeiten zulassen. In der Fahrzeugentwicklung wurde im Rahmen einer Prozessanalyse die Häufigkeit von Simulationen über den Entwicklungsablauf empirisch ermittelt und ausgewertet. Daraus lassen sich dann Meilensteine für bestimmte Eigenschaftsfreigaben ableiten, die sicherstellen, dass alle Eigenschaften gleichermaßen berücksichtigt sind.

Auffällig ist, dass in der Literatur die Berechnung nur durch einen kurzen Zeitabschnitt im Produktenstehungsprozess repräsentiert wird, z. B. führt die Berechnung nach SEIDEMANN [2001] zwei Simulationsschleifen synchron zur CAD-Konstruktion durch und ist lange vor dem SOP fertig. Dies entspricht nicht der Realität, die Simulation ist bis zum Ende der Entwicklung begleitend dabei. Dies ist auch insofern einleuchtend, weil bei der Verfehlung von Anforderungen konstruktive Änderungen wesentlich schneller und billiger mit der Berechnung entwickelt werden können als mit dem Versuch. Dies ist ein weiteres Argument für einen stärker funktional ausgerichteten Entwicklungsprozess, der der wachsenden Bedeutung der Simulation gerecht wird.

2.3.1.1.7 Zeitlich-logisch abhängige Prozessmodellierung

Die besondere Schwierigkeit der Prozessmodellierung in der Entwicklung liegt darin, dass Entwicklungsprozesse nicht deterministisch sind, d. h. jedem Schritt ein logischer nächster folgt, sondern von einer hochgradigen Unsicherheit geprägt sind, sowohl was die Lösung des Problems als auch was die Einflüsse und Methoden zur Lösungsfindung angeht [O'DONOVAN ET AL 2004]. Dies gilt ganz speziell für den Prozess der funktionalen Auslegung, in dem mit-

hilfe der Simulation ständig Entscheidungen über die konstruktive Gestalt des Produkts getroffen werden müssen, der aber nicht simultan, sondern sequentiell verläuft [LÖFFEL 1997]. Der kritische Faktor ist folglich die den Entwicklungsprozessen inhärente hohe zeitliche Dynamik. In Abbildung 2-21 ist das Problem anschaulich dargestellt: zum Zeitpunkt t_{n-1} beginnt die Simulation auf Basis des CAD-Standes $n-1$ mit der Berechnung und Optimierung, die Konstruktion erarbeitet aber bereits den Stand n mit dem Input aus anderen konstruktiven Randbedingungen. Die Berechnungen und Optimierungen im Zeitraum t_{n-1} bis t_n können demnach als Funktion des CAD-Modells CAD_{n-1} aufgefasst werden. Bis das Simulationsergebnis CAE_n zum Zeitpunkt t_n vorliegt, wurden zwischenzeitlich von der Geometrieauslegung bereits neue Informationen in die Modelle eingearbeitet. Die Geometrieauslegung erhält zu diesem Zeitpunkt die Simulationsergebnisse CAE_n , die selbst auf CAD_{n-1} beruhen, und erstellt anhand dieser Daten das Modell CAD_{n+1} . Während die Geometrieauslegung nun ihrerseits die Ergebnisse der Simulation konstruktiv umsetzt, erhält sie auch diesmal wieder Eingaben aus anderen Bereichen. Wenn zum Zeitpunkt t_{n+1} , dem nächsten Start einer Simulation, schließlich die vorgeschlagenen Änderungen bezüglich des Modells CAD_{n-1} überprüft werden können, sind bereits über zwei Perioden wieder neue Informationen angefallen.

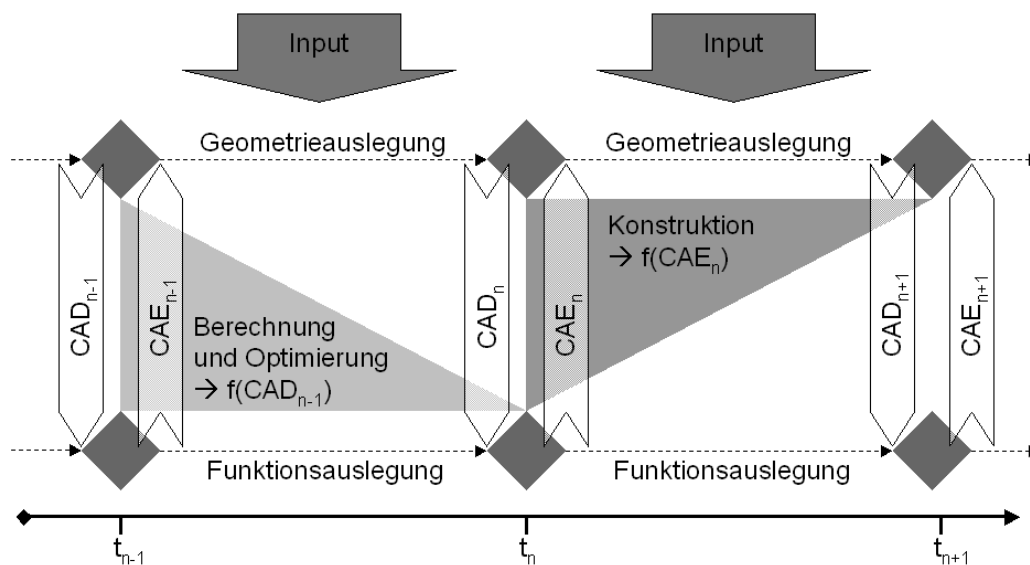


Abbildung 2-21: Abhängigkeit der Konstruktion und Simulation von den Ein- und Ausgangsgrößen im Entwicklungsprozess

Das Modell unterstellt im ersten Schritt, dass es eine Simulation gibt, was in der Realität nicht der Fall ist: es werden eine Vielzahl von Anforderungen simuliert und das zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Von globalen Produkthanforderungen in frühen Phasen bis zu spezifischen Komponentenanforderungen in der Serienentwicklung werden viele funktionale Eigenschaften simuliert, wobei die Entscheidung nach wie vor häufig beim Konstrukteur liegt, vor allem was die spezifischen Komponentenanforderungen betrifft [KELLNER ET AL 1999].

2.3.2 CAD-und CAE-Systeme im Karosserie-Entwicklungsprozess

Das Zusammenspiel von CAx-Systemen in der Prozesskette der Entwicklung und Fertigungsplanung ist geprägt von einem intensiven Austausch von Daten und Informationen und der Aufbereitung derselben. Dies ergibt sich auch dadurch, dass die Prozessbeteiligten verschiedene Informationen benötigen, da sie unterschiedliche Sichten auf das Produkt haben [DAI 2003]. Im Bereich Konstruktion und Simulation steht einem oder maximal zwei CAD-Systemen häufig eine Vielzahl an CAE-Systemen gegenüber, die für die verschiedenen Anforderungen in der Berechnung benötigt werden und die über Jahre gewachsen sind [BURR ET AL 2004]. BURR ET AL [2004] weisen darauf hin, dass sich die Systeme nicht nur untereinander in ihren Funktionalitäten überlappen und redundant sind, sondern dass die Fähigkeiten der Systeme per se zwar überragend sind, die Lücken zwischen ihnen aber nicht systematisch geschlossen werden, so dass die Integration und Zusammenarbeit der so entstandenen IT-Inseln äußerst schlecht ist. Der reine Geometriedatenfluss ist exemplarisch in Abbildung 2-22 dargestellt, die CAD-Daten werden in einem PDM-System gespeichert, daraus von der Simulation ausgelesen und über Schnittstellen in das für die Preprozessoren erforderliche Format gebracht.

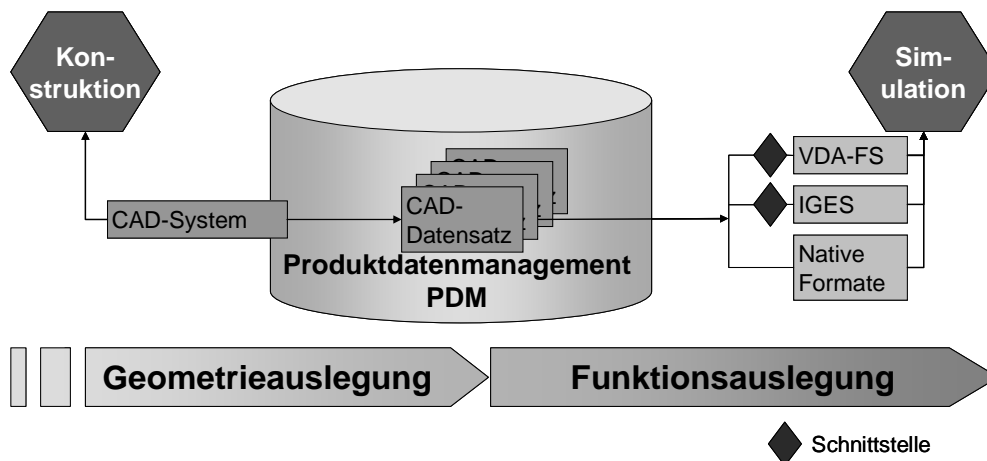


Abbildung 2-22: Geometriedatenfluss von der Konstruktion in die numerische Simulation

Dort werden dann die folgenden Prozessbausteine bis zu einem rechenfähigen Modell durchlaufen, die in Kapitel 2.2 vorgestellt wurden. Für einen Modellaufbau werden nicht nur die reinen Geometriedaten benötigt, sondern eine Vielzahl weiterer Informationen. Abhängig von den verwendeten Schnittstellen sind diese Informationen vorhanden und können vom CAD ins CAE übertragen werden. Abbildung 2-23 zeigt exemplarisch die Informationsgehalte der einzelnen Datenformate in der Karosserieentwicklung. Dabei fällt auf, dass die Schnittmenge der gemeinsamen Informationen von CAD- zu CAE-Modell recht klein ist, nämlich die geometrische Gestalt (die natürlich trotzdem verschieden ist, je nach Modellierungsgrad und Netzfeinheit), der verwendete Werkstoff (der meist in der Simulation noch optimiert wird, je nach Anforderung) und die Masse bzw. Gewicht. Moderne CAD-Systeme sind zwar häufig

theoretisch in der Lage, über wissensbasierte Zusatzwerkzeuge oder Featuretechnologie Zusatzinformationen im 3D-Modell zu speichern, die Möglichkeiten werden jedoch selten ausgenutzt. Dazu kommt, dass über den Datenaustausch ein großer Teil der so aufwendig erzeugten Informationen nicht in das Zielsystem übertragen werden kann. Klar wird in dieser Darstellung auch, dass in der Simulation andere Informationen benötigt werden, so dass sich die Frage stellt, ob es überhaupt sinnvoll ist, das CAD-Modell mit einer Fülle an zusätzlichen Daten anzureichern, die nur einem beschränkten Nutzerkreis zugute kommen, aber einen hohen zusätzlichen Aufwand bedeuten.

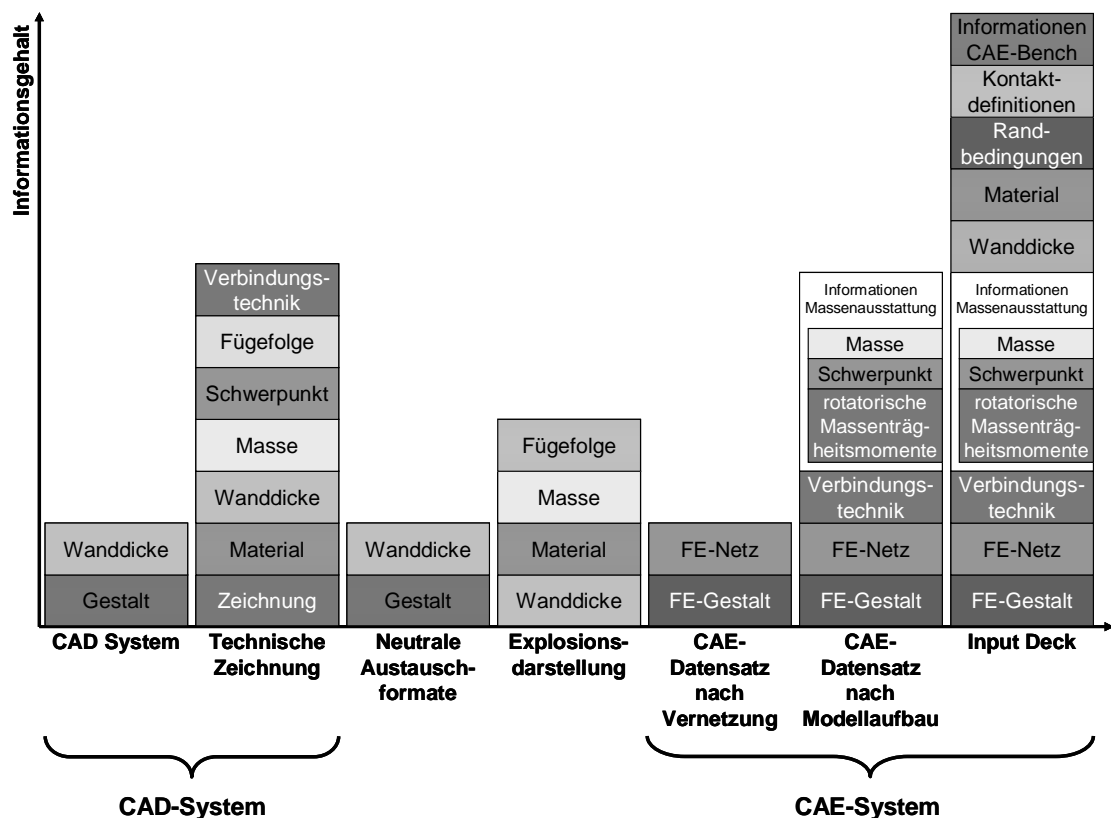


Abbildung 2-23: Informationsgehalte der Daten im CAD-CAE-Prozess der Karosserieentwicklung

In einer Umfrage unter Berechnungsingenieuren im Rahmen des Integrationsprojekts wurden die Quellen der für den Modellaufbau notwendigen Informationen ermittelt. Die wichtigsten für den Modellaufbau benötigten Informationen sind die Geometrie des Teiles, Wanddicke, Masse, Materialkennwerte (sofern sie nicht erst ermittelt werden müssen, je nach Belastungsart), Schwerpunkt, Massenträgheitsmomente, Verbindungstechnik und die Füge- oder Aufbaufolge. Quellen hierfür sind die CAD-Daten, dazugehörige Zeichnungen, eine Teilmenge davon die Schweißgruppenzeichnungen, Explosionsdarstellungen, persönliche Nachfragen, Datenbanken oder Versuche. Unterschieden wurde dabei zwischen häufigen und gelegentlichen Informationsquellen, um festzustellen, welche unbedingt notwendig und welche möglicherweise verzichtbar sind. In Tabelle 2-1 sind die Ergebnisse dargestellt, wobei auffällt, dass

die persönliche Nachfrage die mit Abstand größte Rolle spielt, dicht gefolgt von den CAD-Daten, je nachdem, welchen Informationsgehalt sie bieten können. Auffällig ist ebenfalls, dass die Zeichnungen als Informationsquelle immer seltener genutzt werden, was einerseits daran liegen kann, dass viele Berechnungsingenieure keinen Zugang dazu haben, andererseits aber auch daran, dass die generelle Relevanz von Zeichnungen mit der zunehmenden Einführung und Etablierung von 3D-CAD und Viewing-Systemen, wie z. B. DMU, abnimmt.

		Informationsquelle						
		CAD-Daten	Technische Zeichnung	Schweißbau-gruppenzeichnung	Explosions-Darstellung	persönliche Nachfrage	Datenbank	Versuch
Information	Geometrie	●						
	Wanddicke	●	●		●	●	○	
	Masse	○	○		○	●	○	
	Materialkennwerte	○			●	●	●	●
	Schwerpunkt	●				●	●	○
	Massenträgheitsmomente	○				●	●	○
	Verbindungstechnik	●	○	●	○	●		
	Fügefolge	○		●	●	●		

● häufige Informationsquelle
○ gelegentliche Informationsquelle

Tabelle 2-1: Quellen der für die Simulation relevanten Informationen

Die Vernetzung der CAD- und CAE-Systeme ist demzufolge stark von der Übertragung von Daten und Informationen vom CAD ins CAE und umgekehrt gekennzeichnet. Nach einer Untersuchung in Form einer Anwenderbefragung¹⁹ von KRASEL [2001] nimmt die Datenbeschaffung mit 51% den Hauptanteil an einer Berechnungsschleife ein, die restlichen 49% teilen sich auf in Datenaufbereitung, Modellerstellung, Simulation und Auswertung. Im Rahmen der o.g. durchgeführten Umfrage unter Berechnungsingenieuren im CAD-CAE-Integrationsprojekt konnten diese Zahlen nicht ganz bestätigt werden. Der Aufbau eines rechenfähigen CAE-Modells nimmt bei dem Gesamtprozess Simulation den weitaus größten Zeitanteil der je nach Problemstellung zwischen vier bis sechs Wochen dauernden Berechnungsschleife in Anspruch und liegt bei ca. 70%. Dabei teilen sich die Zeitbedarfe in unterschiedliche Tätigkeiten auf, wie in Abbildung 2-24 exemplarisch am Beispiel eines Trimmed-

¹⁹ Die Datenbasis von KRASEL [2001] bilden 22 befragte Personen aus der Automobilbranche (OEM und Zulieferer).

Body-Modells²⁰ dargestellt: die Vernetzung nimmt etwa 59% in Anspruch, wobei davon ca. 80% automatisiert ablaufen und nur ca. 20% manuelle Nachbearbeitung erforderlich ist, wohingegen der Modellaufbau ca. 41% der Zeit dauert. Von diesen 41% wiederum sind mehr als ein Drittel nur reine Informationsbeschaffung, also Verbindungstechnik, Masse, Schwerpunkt, Randbedingungen, konstruktive Besonderheiten, etc. Fazit aus beiden Umfragen ist jedoch, dass der Daten und Informationsbeschaffung überragende Bedeutung zukommt und eine Verbesserung hier besonders wirksam ist.

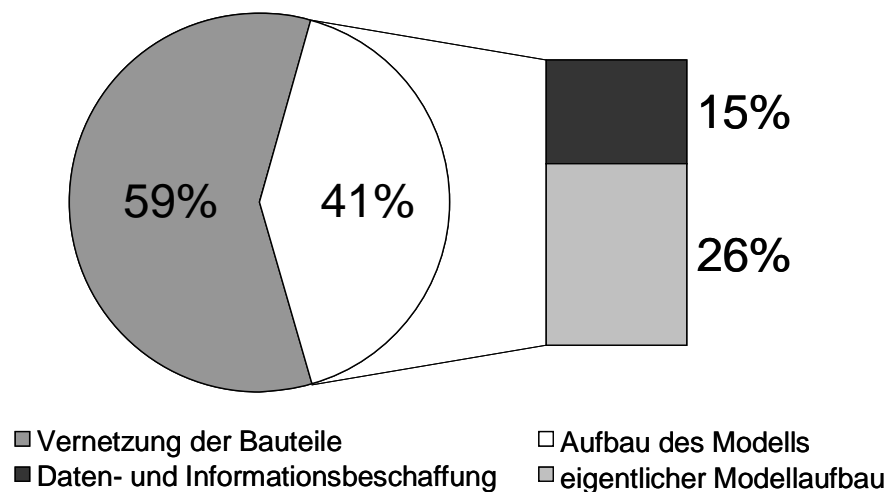


Abbildung 2-24: Aufteilung der Zeitbedarfe Vernetzung und Modellaufbau, sowie die einzelnen Prozessschritte des Modellaufbaus eines Trimmed-Body-Modells

Interpretiert man diese Daten zusammen mit den in Tabelle 2-1 enthaltenen Informationen über die Quellen der für den Aufbau eines Simulationsmodells relevanten Daten, so wird klar, dass die Berechnung in ihrer Prognosefähigkeit sehr stark von externen Einflüssen abhängt, die für die Berechner selbst nur bedingt steuerbar sind. Das Zusammenspiel der CAD- und CAE-Systeme im Entwicklungsprozess ist folglich in seiner Qualität extrem vom Prozess der Informationsbeschaffung abhängig, der wiederum kaum von der Qualität und Leistungsfähigkeit der Werkzeuge an sich beeinflusst wird. Ansätze von z. B. BIANCONI [2002], der den Transfer von CAD-Modellen in die CAE-Umgebung mittels STL-Files vorschlägt, indem das CAD-Modell über trianguläre Flächen vereinfacht und damit verkleinert wird, mit einem Zwischenprogramm wieder für die CAE-Umgebung aufbereitet und im Preprozessor schließlich vernetzt wird, greifen damit an der falschen Stelle an, da das Problem des Informationstransfers zwischen Konstruktion und Simulation nicht oder nur unzureichend adressiert wird. Wie aus den Umfragen und aus der Tabelle 2-1 abzulesen ist, ist die reine Geometrieübertragung nur ein Aspekt der CAx-Integration, der zwar möglichst reibungslos funktionieren muss, nachdem für den Aufbau eines Berechnungsmodells und auch für den Rückfluss der Simula-

²⁰ Definition siehe Glossar Kapitel 8.1.

tionsergebnisse in die Konstruktion aber viel mehr Informationen als die reine Geometrie des Bauteile notwendig sind, liegt der Hebel für eine Effizienzsteigerung im CAD-CAE-Prozess vor allem in der reibungslosen Übertragung von Informationen.

2.3.3 Datenmanagement und Schnittstellen im CAD-CAE-Prozess

Datenmanagement zur Integration von Konstruktion und Simulation

Dem Datenmanagement kommt in der Entwicklung und für alle nachgelagerten Prozessschritte eine große Bedeutung zu. Im Laufe des Produktlebens wird eine unüberschaubare Menge an Daten erzeugt, in denen sich zurechtzufinden und die relevanten Informationen herauszufiltern mittlerweile zu den Hauptaufgaben eines Ingenieurs zählt. PLÜMER [2000] betont, dass ein Kernproblem der Produktentwicklung der gezielte Zugriff auf die richtigen Informationen ist und ca. ein Viertel der Arbeitszeit des Entwicklers durch unproduktives Warten auf die richtigen Daten und Informationen verschwendet wird. Für SCHOTT ET AL [1996] übertrifft der schnelle Zugriff auf benötigte Informationen alle anderen Forderungen im Bereich des CAE an Wichtigkeit und Dringlichkeit. Das Problem des Zugriffs und der Filterung von Daten und Informationen wird durch die massive Einführung von IT-Systemen in allen Bereichen (CAX, PPS, etc.) und der daraus resultierenden Erhöhung der Datenmenge noch verschärft, PDM-Systeme sind ein Ansatz, um administrative Tätigkeiten bestmöglich zu unterstützen [EIGNER & STELZER 2001]. Für komplexe Systeme und Produkte sind die Datenbasen für Konstruktions- und Simulationsdaten jedoch häufig unterschiedlich und die CAD- und CAE-Daten sind nicht miteinander verbunden. BURR ET AL [2003] stellen zu Recht fest, dass die Systemlandschaft in der Automobilindustrie sehr heterogen ist, es gibt verschiedenste Anwendungen für die unterschiedlichsten Problemstellungen, was sich auch in einer Vielzahl von Datenbanken widerspiegelt. Dies ist z. T. aus der Historie der Unternehmen und z. T. aus der zunehmenden Spezialisierung einiger Softwarelösungen zu erklären. ANDERSSON [1999] schlägt hier ein PDM-Framework vor, in dem unterschiedliche Simulationsmodelle, beispielsweise für Kinematik- und Festigkeitsrechnungen, und die Geometrie- bzw. Strukturdaten verwaltet werden können. Dazu werden Objekt-Modelle definiert, in denen die Meta-Daten als Relationen und Attribute in der PDM-Datenbasis repräsentiert werden. Die Objekt-Modelle werden vom PDM-System verwaltet und daraus können die benötigten Systemmodelle generiert werden. Interessant an diesem Ansatz ist die Möglichkeit, verschiedene funktionale Eigenschaften gleichzeitig zu berechnen und somit den Anforderungen an komplexe Produkte Rechnung tragen zu können.

Im Rahmen des Projektes „integrierte Virtuelle Produktenstehung – iViP“ wurde die Integration verschiedenster CAX- und PDM-Systeme adressiert. Grundgedanke dabei ist der iViP-Client als einheitliche, plattformübergreifende Benutzeroberfläche für iViP-konforme Softwareanwendungen. An einen Datenbus sind die Werkzeuge (CAX-, PDM- und iViP-Werkzeuge wie beispielsweise Prozessmanagement, Benutzerkommunikation, etc.) angebunden und können so vom Anwender über den iViP-Client benutzt werden [KRAUSE ET AL 2002]. Dabei kann von einer Integration von CAD- und CAE-Systemen nicht gesprochen werden, die Problematik wird nur im Rahmen der Topologieoptimierung adressiert, siehe

dazu Kapitel 2.3.5. BURR ET AL [2003] weisen darauf hin, dass es für die Integration verschiedener CAX-Werkzeuge und deren erzeugten Daten zwei prinzipielle Lösungsansätze gibt: ein Datenmanagementsystem mit einem Datenmodell als eine „All-in-One“-Lösung, die die gesamte Prozesskette unterstützt und verwaltet. Die zweite Lösung ist das Festhalten an verteilten Systemen, die durch ein zentrales System verbunden werden, das die Strukturen und den Datenaustausch definiert. Zwischen beiden Ansätzen existieren eine Vielzahl von Zwischenlösungen, wobei sich in der Industrie kein eindeutiger Trend feststellen lässt, zumal es nicht unbedingt sinnvoll ist, alle Daten zentral zu verwalten. SCHLENKRICH ET AL [2000] betonen, dass eine CAE-Simulationsdatenbank eher eine Wissensdatenbank darstellt und weniger der reinen Verwaltung von Produktstrukturen und deren Inhalten dient. Dazu kommt, dass die reine Datenmenge der Simulation die der Konstruktion um ein Vielfaches übersteigt, so dass ein gemeinsames System schnell an seine Grenzen der Beherrschbarkeit gelangt, ja nach Komplexität des Produktes.

Viele Ansätze, die PDM-Systeme zur Integration von CAX-Teilprozessen zu nutzen, laufen auf das Monitoring und die Wissensspeicherung hinaus. So dient das PDM-System bei JENNE [2001] beispielsweise als Integrationsplattform für die Akquisition und Nutzung von im Prozess generiertem Wissen, wobei es sich um Prozess- und Produktwissen handelt, eine echte Integration von CAD und CAE wird nicht adressiert. MERKT & KRASTEL [2006] weisen auf eines der Kernprobleme des CAD-CAE-Datenmanagements hin: den zeitlichen Versatz zwischen CAD- und CAE-Daten und die Referenzierung der jeweiligen Modellstände. Dies ist auch schwierig zu bewerkstelligen, da sich die Modellstrukturen nicht aufeinander abbilden lassen, da der Detaillierungsgrad der CAD-Modelle um ein vielfaches höher liegt als der der CAE-Modelle, d. h. Produktstruktur und CAE-Modellstruktur passen nicht zusammen. Aus diesem Grund schlagen MERKT & KRASTEL [2006] eine Verknüpfung der komponentenorientierten Produktstruktur mit der CAE-Modellstruktur vor, indem die Komponenten aus der Produktstruktur idealisiert, transformiert, zusammengefasst und über Ersatzkennwerte abgebildet werden.

Integration von CAX-Systemen über Schnittstellen und Produktmodelle

Eng verwandt mit den Lösungen der CAX-Integration über PDM-Systeme sind Schnittstellenlösungen. HELLMUTH [1997] definiert hier drei Wege des digitalen Produktdatenaustausches: nicht standardisierte Datenformate, standardisierte Datenformate und integrierte Systeme basierend auf Produktmodellen. Durch die Konvertierung von Daten des einen Systems über Schnittstellen in ein anderes System entstehen unweigerlich Informationsverluste, die zwar teils positiv sein können, wenn für die Simulation irrelevante Hilfsgeometrien wegfallen, teils aber auch wichtige Informationen wie z. B. Verbindungstechniken etc. wegfallen [LEE ET AL 2003]. Der Transfer von CAX-Daten über Schnittstellen ist folglich immer mit einem Wegfall von Informationen verbunden, so dass es sich hier um eine unidirektionale Kopplung handelt, d. h. die Hin- und Rückführung der Dateien ist unabhängig voneinander und steht in keinem Kontext zueinander. Eine Vielzahl der Arbeiten basiert auf dem neutralen Standard STEP, besonders auf den Anwendungsprotokollen AP 209 (Verwaltung von Berechnungsdaten) und AP 214 (Verwaltung von Geometriedaten in der Automobilindustrie). Ein weiterer verbreiteter Standard ist CORBA (Common Object Request Browser Architecture), der zur Kommuni-

kations- und Informationsaustauschsteuerung über Systemgrenzen hinaus verwendet wird. HADERER [2000] schlägt einen Ansatz zur Verwendung von CORBA als Integrationsplattform vor, indem er verschiedene Softwaresysteme, in diesem Fall das CAD-System Pro/Engineer und dem Berechnungsprogramm BOLT, mit dem Schraubenverbindungen berechnet werden können, über die Kapselung von Schnittstellen koppelt. Die Technik, Applikationen über neutrale Schnittstellenbeschreibungen zu kapseln, ermöglicht dabei auch die Zusammenführung zweier in Bezug auf die Datenstrukturen, den Programmablauf und die Zugriffsmethoden auf die Modelle unterschiedlicher Systeme. Vorteil des Ansatzes sind die Plattformunabhängigkeit und die Netzwerkfähigkeit von CORBA, Nachteil ist bei diesem Ansatz, dass er derzeit für komplexe Problemstellungen und die Kopplung von CAE-Systemen für numerische Simulation mit CAD-Systemen nicht geeignet ist. Auf diesen Datenformaten basierend werden unterschiedliche Produktmodelle, d. h. umfassende Datenzusammenstellungen, die ein einzelnes Produkt repräsentieren, zusammengestellt. Diese Modelle sollen als logische Verknüpfung von Konstruktions- und Berechnungsinteressen dienen, indem Konstruktion und Berechnung gemeinsam auf diese Modelle zugreifen. In diesem Zusammenhang wird häufig die Qualität der Geometrie angesprochen, die ein elementarer Kostentreiber in der abteilungs- und damit oft der systemübergreifenden Zusammenarbeit ist.

Dem Produktmodell, das auf Basis des neutralen Datenformats STEP AP214, in erster Linie für die Automobilindustrie, versucht, in einem einheitlichen, systemneutralen Datenformat alle Produktdaten zu integrieren [DYLA 2002], kommt große Bedeutung für die Integration von CAX-Systemen und Prozessen zu. KLEINER [2003] unterscheidet hier auch bewusst zwischen einer Kopplung von CAX-Systemen über Schnittstellen und der Integration von CAX-Systemen, für die ein einheitliches Produktdatenmodell eine wesentliche Voraussetzung ist. KLEINER [2003] verknüpft die Partialmodelle von Konstruktion und Simulation für mechatronische Produkte durch Relationen und Transformationen miteinander und erzielt somit eine Integrationsumgebung, allerdings auch mit begrenzter Gültigkeit, denn der gewählte Ansatz lässt sich nicht auf die Problemstellung in der Karosserieentwicklung eines Fahrzeugs übertragen.

Wegen der extrem hohen Produktkomplexität und CAE-Werkzeuganzahl und der daraus resultierenden hohen Komplexität der Produktmodelle und Produktdatenmodelle ist nach HAHN [2005] der Einsatz von Werkzeugen zur Koordinierung von Wissen- und Produktdatenaustausch unumgänglich. Er weist auch auf die explizite Schwäche bei der Nutzung heutiger PDM-System hin: sie werden trotz der prinzipiell vorhandenen Möglichkeit, sie als Wissensmanagementplattform zu nutzen, meist nur als reines Dokumentenmanagementsystem genutzt. In Abbildung 2-25 ist der konzeptionelle Ansatz von HAHN [2005] dargestellt: anstatt umfangreiche Informationen von Werkzeug zu Werkzeug zu transportieren, wird durch Verknüpfungen über Werkzeuggrenzen ein verteiltes Modell geschaffen und so Wissen gespeichert. HAHN [2005] erweitert den Produktmodellansatz, indem er Ontologien nutzt, die implizit vorhandenes Wissen des Entwicklers externalisieren sollen. Damit lassen sich beispielsweise Beziehungen zwischen Anforderungen und Funktionen abbilden und zugänglich machen, die systemtechnische Umsetzung wird mit der Ontology Web Language (OWL) durchgeführt.

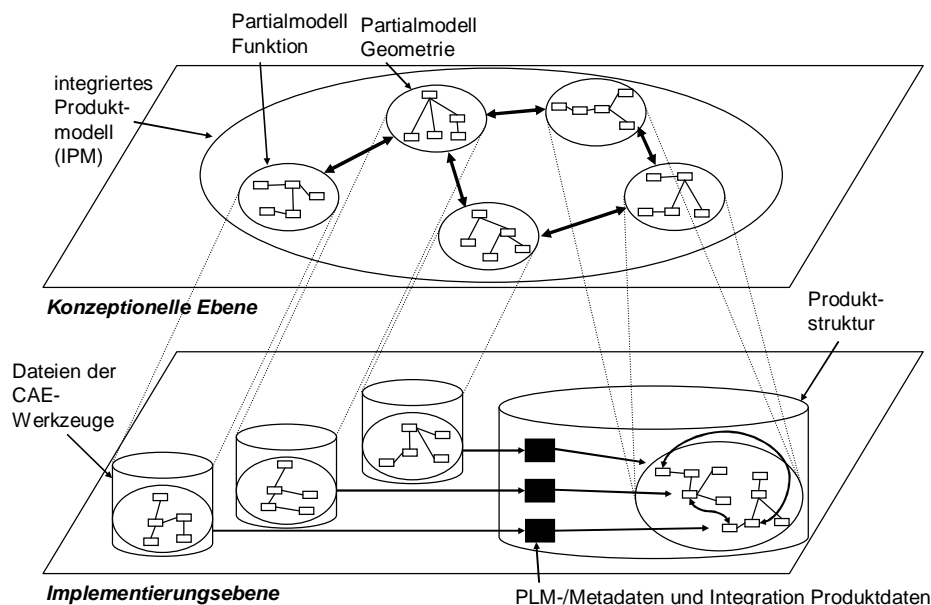


Abbildung 2-25: Konzeptionelle und technische Integration des verteilten Produktmodells [HAHN 2005]

Eine vollständige Lösung für eine Integration von Konstruktion und Simulation bieten die Ansätze über Schnittstellen und Produktmodelle nach wie vor nicht, zumal VERGEEST & HORVATH [2001] die Grenzen der Interoperabilität von CAx-Systemen aufzeigen, in diesem Fall zwar nur für CAD-Systeme, die Systematik lässt sich jedoch auch auf die Problematik CAD-CAE übertragen, nämlich die unvollständige Übertragung von Informationen wegen der unzureichenden Fähigkeiten der beteiligten Systeme.

2.3.4 Sequentielle und kontinuierliche bidirektionale Integration

Im Rahmen des DFG-SPP 732 zur Integration von Gestaltung und Berechnung wurden einige Ansätze der Kopplung von Konstruktions- und Simulationssystemen entwickelt. Meist ist die Kopplung aber einseitig, d. h. es werden aus einem CAD-Modell Simulationsmodelle abgeleitet. So schlagen WECK & KRATZ [1999] beispielsweise ein Verfahren vor, FEM- und MKS-Simulationsmodelle zu koppeln und somit diskrete Zustände der Verfahrenswege von Werkzeugmaschinen zu berechnen. Dabei findet eine Übergabe der CAD-Modelle in Form der geometrischen Struktur sowie der räumlichen Anordnung von Führungen an die Berechnung statt. Zurück übergeben werden Parameterwerte für die Konstruktion, die dann in das CAD-Modell eingearbeitet werden können. Die Übergabe der Parameter ist aber unscharf definiert, so dass dies ein manueller Prozess bleibt, der bei einer hohen Anzahl an notwendigen Änderungen und damit zu ändernder Parameter schnell an seine Grenzen stößt.

Intensiv mit der Problematik der bidirektionalen, phasenübergreifenden Integration von Konstruktion und Simulation hat sich AMFT [2003] beschäftigt. Er schlägt ein über den gesamten Entwicklungsprozess von frühen bis späten Phasen sich beeinflussendes Konstruktions- und Berechnungsmodell vor, wie in Abbildung 2-26 dargestellt, in dem alle Parametervariationen der Gestalt in der Berechnung nachgerechnet werden und der Konstrukteur somit stets über die funktionale Zielerreichung seiner konstruktiven Vorschläge informiert wird. Realisiert wird der Ansatz mit dem integrierten Konstruktionsarbeitsplatz INKA, der das CAD-System Pro/Engineer und als Berechnungsprogramm Mathematica verbindet, zwischen welchen dann eine Parameterübergabe stattfindet.

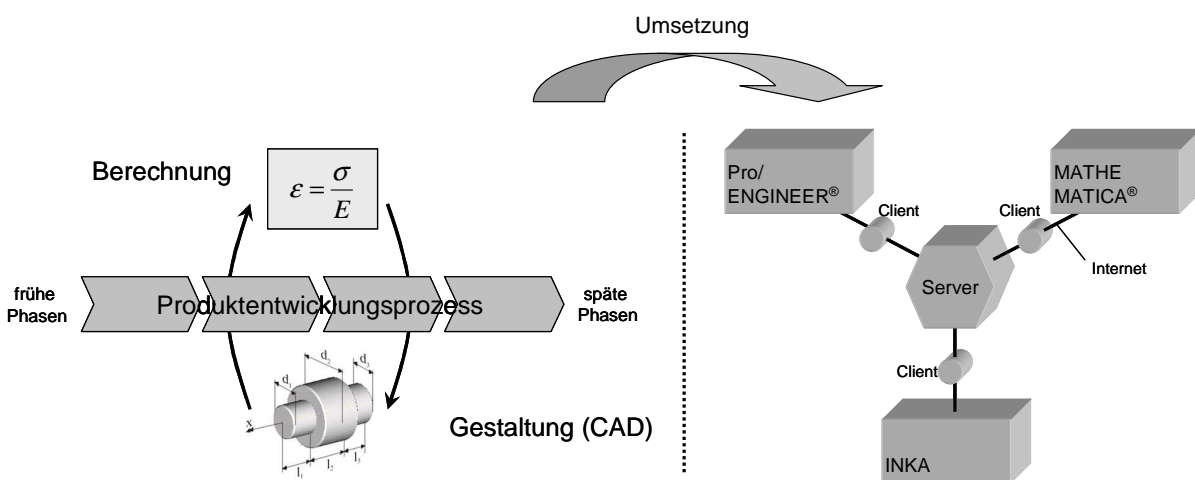


Abbildung 2-26: Phasenübergreifende, bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung und das Umsetzungskonzept mit INKA [AMFT 2002]

AMFT [2003] unterscheidet zwischen sequentieller und kontinuierlicher Integration; im ersten Fall sind Berechnungsalgorithmen und Gestalt nach der Berechnung getrennt und der Konstrukteur kann die Werte selbst bestimmen, im zweiten Fall bleiben die Algorithmen wirksam und erschweren dem Konstrukteur den Zugriff auf die Parameter des Produktmodells. Dies bleibt ein entscheidender Nachteil des Verfahrens, da sich eine kontinuierliche Integration nur schwer umsetzen lässt, zumal die Werte der Auslegungsrechnung selten die Werte sind, die genau so umgesetzt werden können²¹. Ein weiterer Nachteil des Verfahrens ist, dass es sich lediglich für analytische Berechnungsmethoden eignet und nicht für die numerische Simulation. Außerdem gilt es aus Sicht des Entwicklungsprozesses und der weiteren Anforderungen an das Produkt sicherlich zu hinterfragen, ob ein ständiger Abgleich mit wenigen funktionalen Anforderungen sinnvoll und richtig ist.

²¹ Berechnungsergebnisse beispielsweise eines Wellendurchmessers von 7,386mm werden dann in der Konstruktion unter Berücksichtigung von Normen, Herstellbarkeit, etc. auf sinnvolle Maße gerundet [AMFT 2002].

2.3.5 Kopplung von CAD- und CAE-Systemen

Die IT-Systemlandschaft ist nach wie vor von zahlreichen Medienbrüchen gekennzeichnet, nahezu jedes System benötigt sein eigenes Datenformat, das über Schnittstellen, bei denen viel Informationen verloren gehen, in andere Systeme übertragen werden muss. MÜLLER [2006] spricht hier von unidirektional gekoppelten Prozessketten. Bestandteil der Integration von Konstruktion und Simulation in der Forschung und der Industrie ist das Bemühen um die direkte Kopplung der IT-Werkzeuge in beiden Bereichen. Der Handlungsbedarf ist in Abbildung 2-27 dargestellt, Änderungen in den Systemen müssen manuell übertragen werden, wobei das CAD-System als Ursprungssystem und auch als Referenzsystem im Zentrum steht. Die vom CAD-System wegführenden Übertragungswege in die FEM-Berechnung bzw. die Virtual Reality sind nach dem derzeitigen Stand der Technik noch Sackgassen.

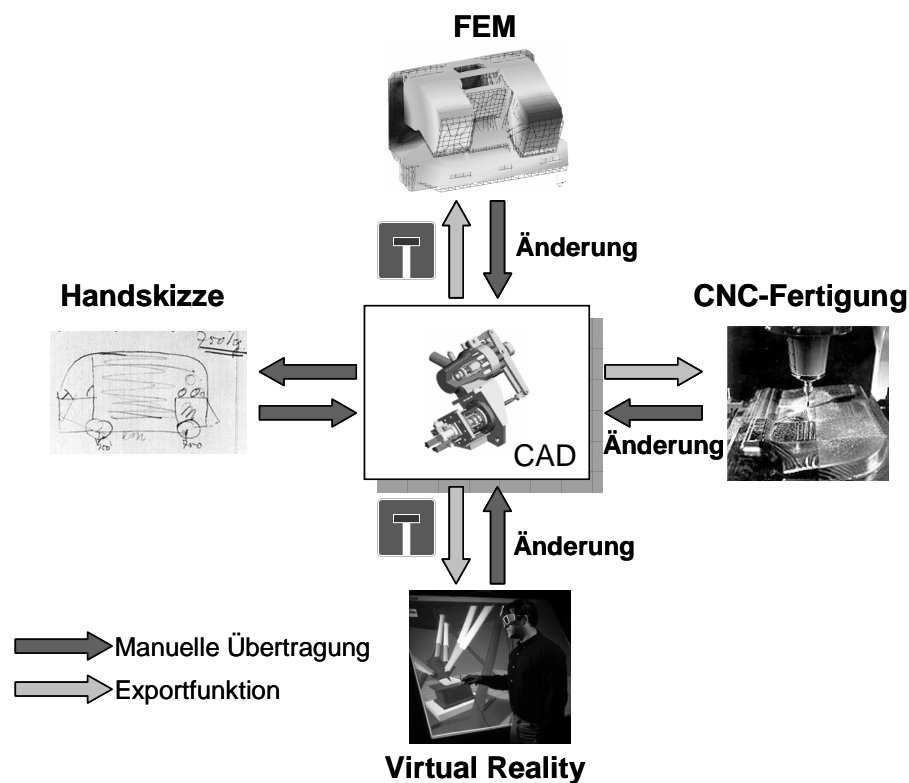


Abbildung 2-27: Datentransfer zwischen CAx-Systemen [MÜLLER 2006]

Das CAD-System als Mittelpunkt der virtuellen Produktentwicklung erfordert für die unterstützenden Systeme nach wie vor sehr viel manuelle Übertragungsarbeit bzw. bei Änderungen, seien sie funktions- oder fertigungsbedingt, den entsprechenden Nachbearbeitungs- bzw. Änderungsaufwand im CAD. Zwar lassen sich Daten über neutrale Schnittstellen vom CAE- ins CAD-System übertragen, die Geometrie ist für den Konstrukteur aber lediglich als Vorlage brauchbar. Es existieren auf diesem Gebiet einige Einzellösungen, die im Folgenden kurz

erläutert werden. Im Zusammenhang mit der Integration von Konstruktion und Simulation im Entwicklungsprozess wird häufig die Dimension Daten bzw. Werkzeuge betont (siehe Kapitel 3.2). Es existieren zahlreiche Ansätze einer direkten bidirektionalen Kopplung von CAD und CAE-Systemen, um Daten in beide Richtungen reibungsfreier übertragen zu können, und die Interpretation der Daten durch die unterschiedlichen Systeme erst zu ermöglichen. BÄR [2002] betont hier zu Recht, dass die reine Kopplung von CAD-Systemen mit Finite-Elemente-Programmen noch keine Integration von Konstruktion und Simulation darstellt, weil es kein Berechnungsverfahren gibt, das über den gesamten Konstruktionsprozess mit Erfolg anwendbar ist. Dem Produktentwickler müssen phasenabhängig Berechnungsverfahren zur Verfügung gestellt werden, die mit den jeweils verwendeten CAD-Systemen zusammenspielen können.

Dieses Zusammenspiel kann eine direkte Kopplung sein, bei der die unterschiedlichen CAx-Systeme in der Lage sind, die Daten des jeweils anderen Systems zu interpretieren und vor allem strukturelle, meist geometrische, Änderungen zu adaptieren oder Daten über PDM-Systeme bzw. gängige Schnittstellen zu übergeben, siehe dazu Kapitel 2.3.3. Dazu gibt es Ansätze über parametrisierte CAD-Modelle [SCHUMACHER ET AL 2002] oder assoziative FE-Netze [FORSEN & HOFFMANN 2002], die aber bislang noch Forschungscharakter besitzen und sich noch nicht in der industriellen Praxis durchgesetzt haben. MENDOCA [2006] führt drei Ebenen der CAD-CAE-Integration ein: die CAD-eingebettete, die CAD-gekoppelte und die über Schnittstellen verknüpfte CAE-Software. In Tabelle 2-2 sind die drei Ebenen mit ihren Vor- und Nachteilen dargestellt. Ergänzend dazu ist anzumerken, dass es in den meisten Unternehmen eine Vielzahl von Softwarelösungen gibt, vor allem auf der Berechnungsseite existieren viele Speziallösungen für bestimmte Problemstellungen, die jeweils ihre eigenen Quellcodes besitzen und häufig von verschiedenen Softwareherstellern stammen, die in der Regel kein großes Interesse daran haben, ihr Know-How offen zu legen und sich mit den anderen Programmen zu vernetzen. Daher bleibt es abzuwarten, ob sich in der Softwareindustrie eine ähnliche Konzentration abzeichnet wie in anderen Branchen, sonst wird die direkte Kopplung von Systemen noch lange auf sich warten lassen, selbst wenn die technischen Möglichkeiten gegeben sind.


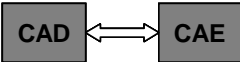
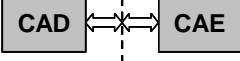
	Vorteile	Nachteile
<p>CAD eingebettet (Alles in einem)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> •Voller Zugriff auf native Geometrie, Features und Parameter •Beste Voraussetzungen für Geometriebereinigung (Kenntnis über Systemoptimum) •Keine Geometrieübersetzung •Defeaturing 	<ul style="list-style-type: none"> •Systemauswahl in eingeschränkt (schwieriger und teurer Systemwechsel) •Kein einfacher Austausch von CAE Baugruppen •Verzögert oder verhindert sogar den Zugriff auf innovative neue Technologien •Fehlende Unterstützung für Multi-CAD-Umgebung
<p>CAD gekoppelt (Geometrie)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> •Keine Geometrieübersetzung •Defeaturing •Unterstützt die schnelle Entwicklung innovativer Technologien •Relativ einfach und kostengünstig ersetzbar •Verfügbar für Multi-CAD-Umgebung 	<ul style="list-style-type: none"> •Erfordert mehrere native Geometriekerne (Lieferantenangelegenheit) •Begrenzter Zugriff auf Parameter •Eingeschränkter bidirektionaler Datenaustausch mit CAD
<p>CAD verknüpft (Standards)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> •Relativ stabil aufgrund langer Nutzungsdauer •Unterstützt Multi-CAD- und Multi-CAE-Umgebung •existierende Standards (IGES, STEP, VDA-FS, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> •Geometriebereinigung erfordert spezielle Software •Größere Gefahr des Verlustes von Geometrieinhalt durch Übersetzung •Kein Defeaturing •Zusätzlicher Schritt in der CAD-CAE Kette

Tabelle 2-2: Ebenen der CAD-CAE-Integration [MENDOCA 2006]

Kopplung mit Unterstützung von Parametrik und Assoziativität

Zwei unterschiedliche Trends sind zu erkennen, wenn es um die logische Verknüpfung von Daten über Parametrik (d. h. die Übertragung bzw. gemeinsame Verwendung von Kennwerten in unterschiedlichen Datensätzen, z. B. die Übertragung eines Wellendurchmessers aus einem CAD-Datensatz in einen weiteren) und Assoziativität (d. h. die Einbindung eines Datensatzes als Kenngröße in einen weiteren Datensatz, z. B. die Verwendung der Geometrie der Tür, um die Form des Türrahmens automatisch zu bestimmen) geht. Zum einen werden marktgängige Systeme wie CATIA V5, Pro/Engineer und UGS über angepasste Schnittstellen direkt in unterschiedliche FEM-Systeme eingebunden. Alternativ wird die Vernetzung verschiedener Systeme über extern abgelegte, in neutralen Formaten abgebildete Parametrik vorgeschlagen, um unterschiedliche Ausprägungen der Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Berechnung zu verbinden (z. B. Bauteile, Zusammenbauten, Schweißpunkte oder Netze). In der Konsequenz führt der letztere Ansatz zu einer Art gemeinsamen Produktmodell, das durch seine Zugänglichkeit aus unterschiedlichen Systemwelten eine Zusammenarbeit fördert. Ein Ansatz zur direkten Vernetzung von CAD- und CAE-Systemen liefert BOSHOFF [1997] mit einer direkten Kopplung zwischen der Geometrie und dem FEM-Modell. Die prinzipielle Vorgehensweise ist in Abbildung 2-28 dargestellt, es werden CAD-Daten im FEM-System eingelesen, zerlegt und vernetzt und nach der Strukturoptimierung wieder in das CAD-System übertragen, wo eine Interpretation und Änderung der CAD-Daten stattfindet. Dies funktioniert

mit einfach aufgebauten Volumenkörpern, die in der Simulation keine wesentliche Topologieänderung erfahren, für komplexe Freiformgeometrien ist das Verfahren bislang nicht geeignet.

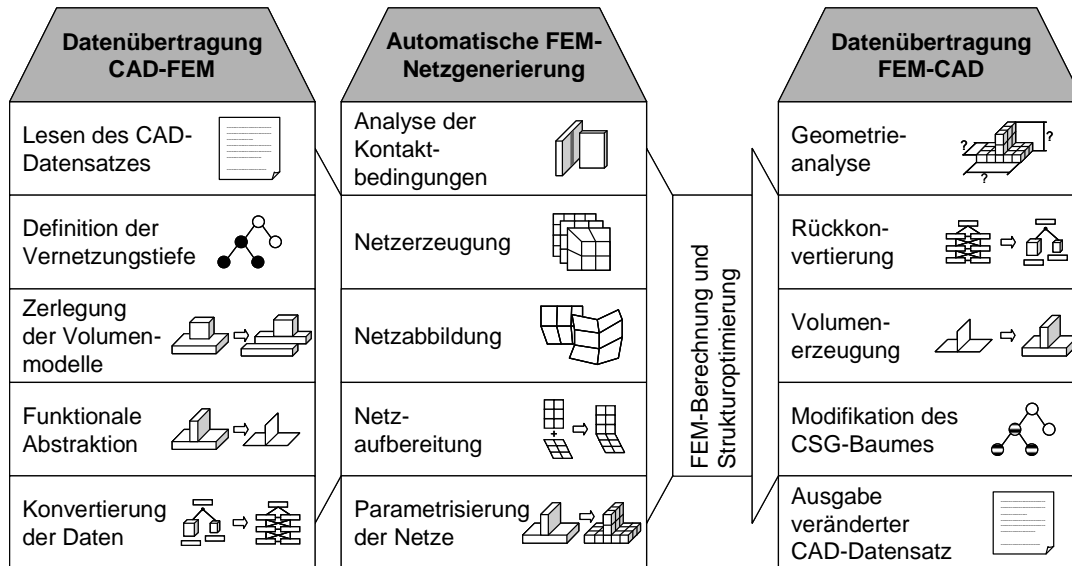


Abbildung 2-28: Vorgehen bei der direkten Kopplung CAD-FEM [BOSHOFF 1997]

Nutzung der Featuretechnologie zur CAD-CAE-Integration

Eng verwandt mit der Parametrik ist die Feature-Technologie, die bereits in Kapitel 2.2.1 in Grundzügen beschrieben wurde, und die als Integrationsplattform für Konstruktion und Simulation in der Forschung und Technik intensiv genutzt wird, gemessen an der Anzahl wissenschaftlicher und industrieller Veröffentlichungen. Wegen der großen Anzahl werden nur exemplarisch einige Ansätze herausgegriffen und im Folgenden kurz vorgestellt, wobei anzumerken ist, dass die Breite der Integrationsansätze etwa der Breite der Definition eines Features entspricht. AIFAQUI ET AL [2006] unterteilen die Analyseaufgabe bzgl. der Produkteigenschaften in drei Partialmodelle: das mechanische, das Beobachtungs- und das Simulationsmodell, die wiederum unterschiedliche Sichtweisen auf und damit Informationen über das Produkt liefern. Auf dieser Basis wird ein Analysis Feature (AF) definiert, das eine parametrische, generische Einheit, die eine mechanische Analyseklasse charakterisiert, darstellt. Das AF enthält die drei Partialmodelle und bei Änderungen der Eingangsgrößen wird der Prozess neu durchlaufen, wie in Abbildung 2-29 gezeigt. Notwendige Voraussetzung für diesen Ansatz ist die Existenz eines Produktmodells, das die einzelnen Partialmodelle als unterschiedliche Sichten auf das Gesamtprodukt repräsentiert. Einzelne Simulationsprobleme werden gekapselt und können dann auch entsprechend wieder verwendet werden, als Beispiel dient ein Kinematikfeature, das aber deutlich einfacher umzusetzen ist als numerische Simulationsprobleme.

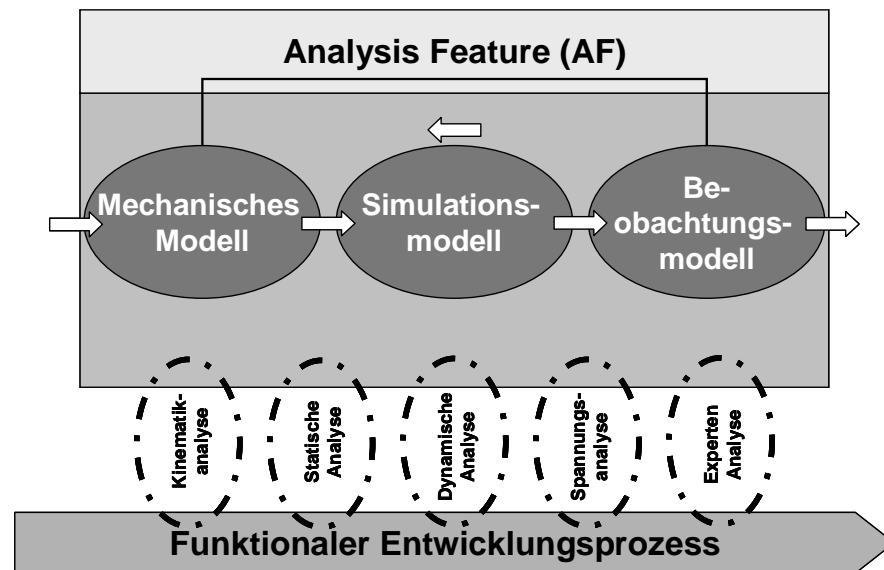


Abbildung 2-29: Generischer Analyseprozess durch das Analysis Feature [AIFA-OUI ET AL 2006]

Die Verwendung semantisch hochwertiger Features für die Unterstützung der Integration schlägt HOFFMANN [2002] vor, wobei die Höherwertigkeit der Features durch die Kopplung von Basisfeatures erreicht wird. Dabei wird eine durchgängige Verwendung von Features von der Konstruktion bis zur Simulation vorgeschlagen, im Geometrieerstellungsprozess werden geometrische Features verwendet, anschließend eine analytische Berechnung durchgeführt, die von dem System KoBe (Konstruieren und Berechnen) unterstützt wird und beliebig wiederholt werden kann. Daraufhin erfolgt eine FEM-Berechnung, in der mithilfe der Feature-technologie, die Wissen für den richtigen Modellaufbau liefert, eine Modalanalyse einer Passfederverbindung durchgeführt wird. Die Verwendung von Features als Wissensträger im Entwicklungsprozess wird mehrfach diskutiert, so entwickelt STEINBRINK [2000] beispielsweise eine Lösung für späte Phasen des Entwicklungsprozesses, indem er den geometrischen Features einer Konstruktion erstens berechnungsrelevante Informationen zuweist und zweitens eine Methode für den Nachweis entwickelt, ob die Features überhaupt berechnungsrelevant sind, d. h. Einfluss auf das Ergebnis haben können oder ob sie im FEM-Modell vernachlässigt werden können. BÄR [1998] hingegen verwendet die Feature-Technologie für die frühen Phasen der Produktentwicklung, indem er damit Elementpaarungen modelliert, die somit Informationen über die Freiheitsgrade von Körpern, eine Voraussetzung für die nachfolgenden Berechnungen, enthält. WEHNER [2003] schlägt ein Featuremodell vor, das aus zwei Teilmodellen besteht, die den Bedürfnissen und Randbedingungen von CAD und CAE Rechnung tragen, und dem die Modellierung der strukturellen Vielfalt der Geometrierepräsentationen der unterschiedlichen Disziplinen als elementares Prinzip zugrunde liegt. Die Ansätze der Featuretechnologie als Träger der Integration von Konstruktion und Simulation laufen damit sehr stark auf den Bereich Übertragung und Nutzung von Informationen bzw. dadurch die

Automatisierung von Konstruktions- und Berechnungsschritten und Wiederverwertung von Wissen und Informationen hinaus.

Topologieoptimierung und Rückführung geänderter Geometrien

Einen zu BOSHOFF [1997] verwandten Ansatz wählt HESSEL [2003], in dem die rückgeführten Geometrien aus der Strukturoptimierung in der Simulation mit geeigneten mathematischen Verfahren geglättet werden, damit der Bearbeitungsaufwand im CAD deutlich reduziert werden kann. Das Verfahren ist in kommerziellen Topologieoptimierungssystemen bereits im Einsatz und wird häufig verwendet. Dadurch lassen sich z. B. aus der bearbeiteten Geometrie Rapid-Prototyping-Modelle anfertigen [BURBLIES ET AL 2003], was auf eine gute Anwendbarkeit des Verfahrens schließen lässt. Wie in Kapitel 2.3.4 ausführlich erläutert, ändert AMFT [2003] die Geometrie des Bauteils über Parameteränderung, d. h. es werden die in der analytischen Berechnung mit Mathematica geänderten Parameter in das parametrische CAD-System Pro/Engineer übergeben, welches die geometrischen Maße auf die notwendigen Werte ändert und die Geometrie anpasst. SAUTER [1999] schlägt einen Weg der integrierten Topologie- und Gestaltoptimierung vor, dessen prinzipieller Prozess in Abbildung 2-30 dargestellt ist. Die Strukturoptimierung wird unterteilt in Topologie-, Dimensionierungs-, parameterfreie und parameterorientierte Gestaltoptimierung, wobei der prinzipielle Prozess sich immer aus denselben Bausteinen zusammensetzt, sich die Verfahren aber hinsichtlich ihrer Komplexität deutlich unterscheiden. Nach der Modellerstellung wird das CAD-Modell in den Preprozessor transferiert, das Modell aufbereitet, zum Solver transferiert, das numerische Modell analysiert, die Ergebnisse ausgewertet und das Modell verändert, wie in Abbildung 2-30 gezeigt. Die optimierte Geometrie kann entweder direkt geglättet werden und dann im CAD weiterverarbeitet werden, z. B. als Vorlage zur Nachkonstruktion oder für Versuchsteile, oder im Fall der parameterorientierten Gestaltoptimierung in Form von Designparametern an die Konstruktion übergeben werden, was derzeit allerdings nur für wenig komplexe Problemstellungen geeignet ist, da dies Verfahren nur für wenige Designvariablen zuverlässig funktioniert.

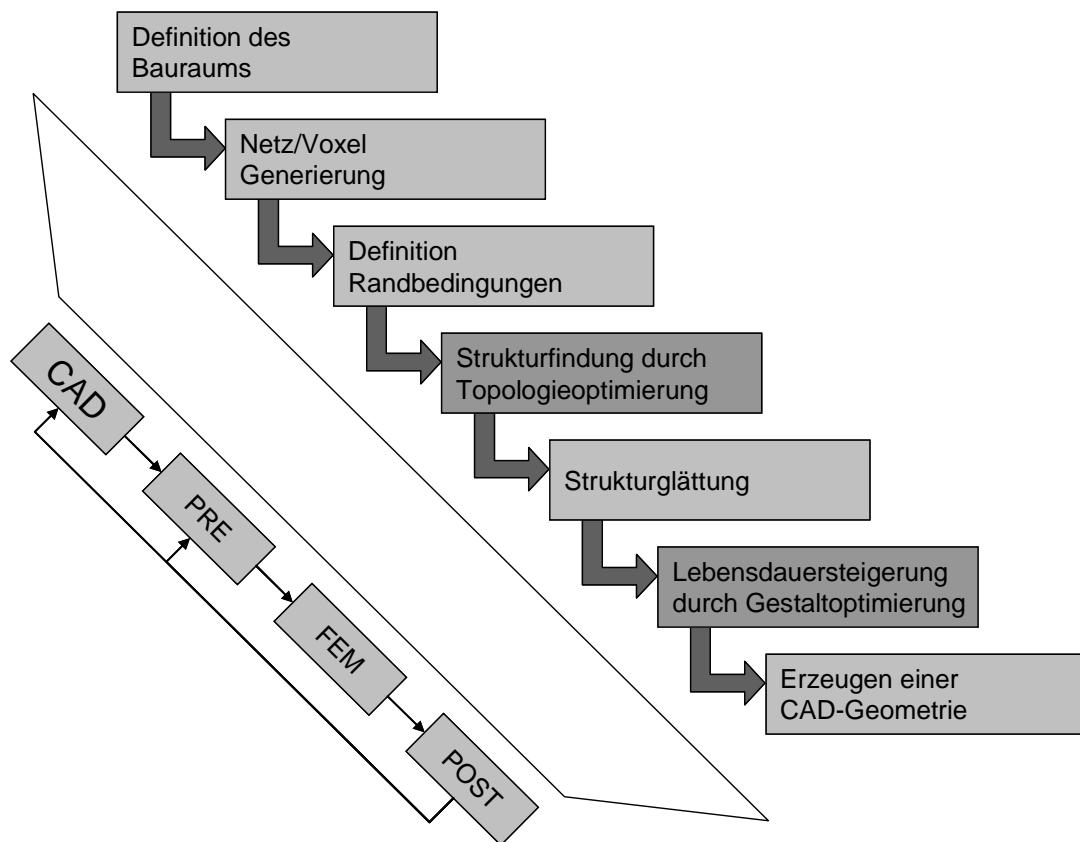


Abbildung 2-30: Integrierte Topologie- und Gestaltoptimierung aus Sicht des Konstrukteurs [NACH SAUTER ET AL 1999]

Eine Beispiel der Umsetzung des Verfahrens liefern WEID ET AL [2004], die mit der Topologie- und Gestaltoptimierung ein Vorderradbremsenkonzept entwickeln, wobei die Besonderheiten darin bestehen, dass zahlreiche CAE- und CAD-Programme in Form von Pre- und Postprozessoren sowie verschiedenen Solvern in die Prozesskette einbezogen werden. Außerdem finden fertigungstechnische Gesichtspunkte, wie gussgerechte Gestaltung, besondere Berücksichtigung in den Optimierungsläufen. Hier zeigen sich aber auch die Grenzen der meisten Verfahren für die Integration von Konstruktion und Simulation: die Komplexität und Gestalt der Produkte und die spezifischen Anforderungen. Die Vernetzung von Geometrie und FE-Netz ist auf Bauteilebene in der Produktstruktur sehr einfach und somit ein rein datentechnisches Problem, wird die Produktstruktur aber komplexer und besteht aus einer Vielzahl von Bauteilen mit unterschiedlichen Werkstoffen und Verbindungstechniken, dann stoßen die Verfahren an ihre Grenzen. Die meisten Verfahren der Topologieoptimierung konzentrieren sich auch auf Volumenbauteile, wie z. B. Werkzeugmaschinen, Achsträger, Bremssysteme, etc., die sich durch einen deutlich höheren Anteil an Regelgeometrien auszeichnen als eine Fahrzeugkarosserie, für die diese Verfahren noch nicht weit genug entwickelt sind. Dazu kommt, dass die zahlreichen sich überlagernden und widersprechenden Anforderungen an

komplexe Produkte eine einseitige Optimierung verbieten, so dass in Zukunft geeignete Verfahren für eine multidisziplinäre Optimierung zu finden sind. Erste Ansätze dazu liefern HOPPE ET AL [2005] mit einer multidisziplinären Optimierung der Karosserie hinsichtlich Crash- und NVH-Lastfällen, wenngleich die Variablen sich vorerst auf einfache geometrische Parameter wie Wandstärken von Blechteilen und nicht-geometrische Parameter wie den Werkstoff beschränken. Im nächsten Schritt sind hier weitere Untersuchungen in Richtung Kopplung zu CAD-Systemen zur Rückführung von Ergebnissen und die Strukturierung der Anforderungen bzgl. Komponenten- und Gesamtprodukteigenschaften notwendig.

2.3.6 Integrierende Systeme

Integrierende Systeme, z. B. Produktdatenmanagementsysteme, spielen eine große Rolle. Da solche Systeme seit vielen Jahren Stand der Technik für die Konstruktionsdatenverwaltung sind, haben sie einen hohen Reifegrad erreicht und werden für eine Vielzahl von unterschiedlichen Entwicklungssituationen angeboten. Sie dienen daher häufig als Rahmensysteme für eine gemeinsame Daten- und Informationsverwaltung sowie zur Abstimmung und Übertragung von Ergebnissen zwischen Konstruktion und Berechnung. Typische Ansätze verfolgen dabei die IT-unterstützte logische Verknüpfung von Dokumenten und die Einbindung von Workflows, also teilautomatisierten Prozessabschnitten, in die Datenhaltung. Eine weitere Ausprägung der integrierenden Systeme ist die Einbindung eines CAx-Systems in ein anderes, wie dies zum Beispiel bei den in CAD-Systeme integrierten FEM-Berechnungsfunktionalitäten der Fall ist. Auch hierzu werden für spezifische Fragestellungen Ansätze zur Kombination bzw. Zusammenfassung der Systeme vorgeschlagen. Eine mittlerweile sehr gängige und auch im industriellen Umfeld häufig genutzte Möglichkeit für alle Arten von Berechnungen zur Unterstützung der Integration von Konstruktion und Simulation sind diese integrierenden Systeme. Viele Ansätze beschäftigen sich mit der Anwendung der CAD-integrierten FEA unter Ausnutzung der vorhandenen Softwarepotentiale, bewerten aber mehr die Leistungsfähigkeit der Software und trennen demzufolge in Lastfälle, die im CAD-System simuliert werden können und Lastfälle, für die weitergehende Software notwendig ist [SCHÖTTL ET AL 2004].

FEM-Funktionalitäten im CAD-System

Eine Möglichkeit zur Integration von Konstruktion und Simulation bieten die in die CAD-Systeme integrierten Berechnungswerkzeuge, meist lineare Solver mit einfachen Vernetzungs-, Modellierungs- und Auswertefunktionen. Der Trend der kommerziellen Softwarehersteller geht stark in diese Richtung, da die Konstruktion mit ihren CAD-Systemen die zentrale Rolle im Produktentwicklungsprozess spielt [HIEROLD ET AL 2004]. Im Rahmen des CAD-CAE-Integrationsprojektes wurden Einsatzszenarien für Anwendungen der CAD-integrierten FE-Analyse untersucht. Dabei wurden statische Lastfälle für Einzelkomponenten bzw. Baugruppen mit klar definierten Randbedingungen aus den Bereichen Innenausstattung und Karosseriestruktur untersucht, die jeweils mit den Ergebnissen aus den spezialisierten FE-Programmen und den Versuchen verglichen wurden. Es zeigt sich, dass die Möglichkeiten der Software zwar noch limitiert sind, eine Anwendung im Produktentwicklungsprozess unter

bestimmten Umständen aber sinnvoll sein kann. Entscheidende Kriterien für die Anwendung von CAD-integrierter FEA sind abseits von allen Einsatzszenarien aber die Wirtschaftlichkeit und die Risiken für den Entwicklungsprozess, die in direktem Zusammenhang mit der Qualität der Ergebnisse der Simulation stehen.

Als Unterstützung der Berechnung kann die CAD-integrierte Berechnung einen Beitrag zur engeren Vernetzung von Konstruktion und Berechnung in allen Phasen des Produktentwicklungsprozesses leisten. In der Konzeptphase können Bauteile und kleinere Baugruppen in der Konstruktion schnell überschlägig berechnet werden, in der Serienentwicklung lassen sich Lösungen vergleichen und so schnell Kriterien für eine Lösungsauswahl finden. Die Anwendungen sind nach dem Stand der Technik jedoch auf lineare Problemstellungen beschränkt, was nach HIEROLD ET AL [2004] auch sinnvoll ist, da die Komplexität einer nichtlinearen Simulation so hoch ist, dass sie Spezialisten vorbehalten bleiben wird, schon allein um die Fehleranfälligkeit des Prozesses zu minimieren. Für begrenzte Auslegungen von Einzelteilen und kleinen Baugruppen ist die linear-statische FEM aber durchaus geeignet und für den Konstrukteur erlernbar, was auch den großen Vorteil hat, dass der Konstrukteur selbst am besten weiß, welche Anforderungen bzw. Änderungsmöglichkeiten bestehen.

Nach HERFELD ET AL [2005] sind drei Wege oder deren Kombination denkbar, wie die CAD-integrierte Berechnung genutzt werden kann:

- Konstruktion übernimmt die Auslegung einfacher statischer (Bauteil-)Lastfälle, die Simulation macht ausschließlich die komplexen Lastfälle, für die Spezialisten benötigt werden.
- Konstruktion als Vorstufe zur Berechnung: Vorauslegungen und evtl. die Vernetzung werden in der Konstruktion durchgeführt, die Auslegung und Gesamtoptimierung hinsichtlich aller relevanten Komponenten- und Gesamtfahrzeuglastfälle liegt bei der Simulation.
- Vernetzung und Abbildung der Randbedingungen der Konstruktion im CAD-, Durchführung der eigentlichen Berechnung im CAE-System.

Die Szenarien setzen eine Weiterentwicklung der Softwareprodukte und der Prozesse in der Industrie voraus, zeigen aber sehr deutlich, dass eine klare Abgrenzung von Aufgaben und Verantwortlichkeiten nicht einfach möglich ist, und der Komplexität heutiger Produkte mit vielfältigen Anforderungen kaum mehr Rechnung trägt. Notwendig ist eine intensive und nachhaltige Vernetzung von Konstruktion und Simulation mit klaren Rollen und Verantwortlichkeiten, zu der die CAD-integrierte FEA die genannten Beiträge leisten kann. Weiterer Forschungsbedarf auf dem Gebiet CAD-integrierte FEA besteht im Wesentlichen in der FEM-tauglichen Abbildung von Randbedingungen, der Assoziativität von der Geometrie zu den FE-Netzen und schließlich der Verankerung der Softwarewerkzeuge in einem effizienten Produktentwicklungsprozess [HERFELD ET AL 2005].

Geometrierstellung in der Simulation

In den frühen Phasen der Produktentwicklung ist die Geometrie gewöhnlich noch nicht in für die Berechnung ausreichendem Maße vorhanden, dafür sind die Anforderungen an das Produkt meist schon recht gut definiert. Für erste Auslegungs- und Dimensionierungsrechnungen benötigt die Simulation daher Eingangsdaten, die in der Fahrzeugentwicklung aus verschiedenen Quellen stammen können. Dafür gibt es prinzipiell drei Möglichkeiten, die in Abbildung 2-31 dargestellt sind: die Geometrierzeugung in der Simulation, die Anpassung von Vorgängermodellen und die Geometrierzeugung in der Konstruktion.

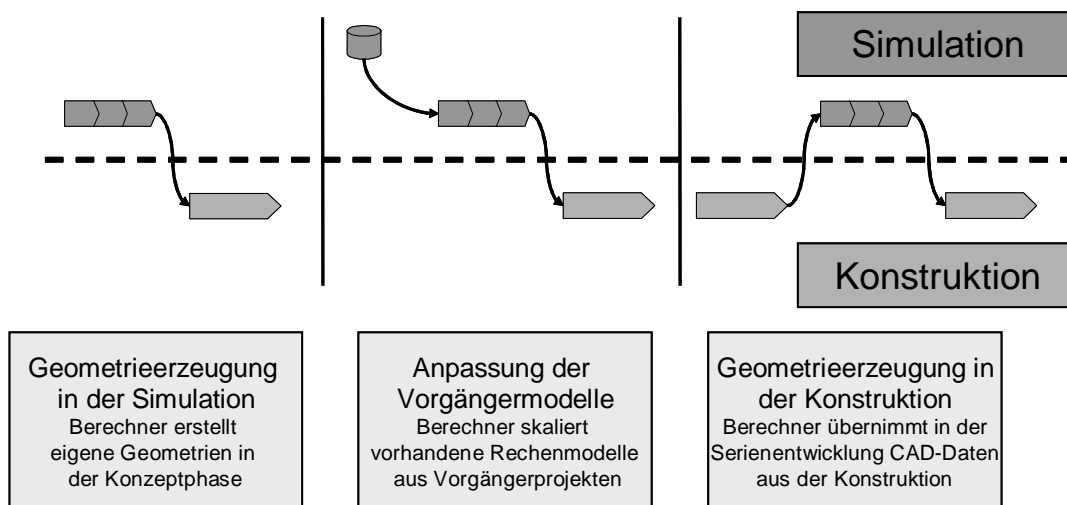


Abbildung 2-31: Varianten der Geometrierstellung für die Simulation

VOLZ ET AL [2006] wählen SFE-Concept, ein parametrisches Softwarewerkzeug für die Simulation, mit dem einfache Geometrien parametrisch-assoziativ aufgebaut werden können und mit dem integrierten Mesh Generator schnell vernetzt werden können, um in der Konzeptphase Form- und Gestaltoptimierungen in der Karosserieentwicklung bzgl. Crasheigenschaften durchführen zu können. Daneben können für die frühen Phasen Vorgängermodelle verwendet und modifiziert werden, um zu ersten Berechnungsergebnissen zu gelangen [FRISCH 2004]. Somit ist der Simulationsingenieur nicht nur davon abhängig, CAD-Daten aus der Konstruktion zu erhalten, sondern in der Lage, für schnelle Konzeptbewertungen eigene Geometrien zu erstellen [SCHELKLE & ELSENHANS 2000]. Nach der in Kapitel 3.1.1 geschilderten Anwenderbefragung wird die Skalierung von Vorgängermodellen zu ca. 60% und die eigene Geometrierstellung zu etwa 40% verwendet [DEUBZER ET AL 2005A].

In der Serienentwicklung, wenn die Optimierung von detaillierten Geometrien der Bauteile im Vordergrund steht, werden eine Vielzahl an Varianten in der Simulation erzeugt, z. T. mit Parameter-, aber auch mit Geometrievariationen, die wie bei der Skalierung von Vorgängermodellen mit im Preprozessor integrierten Morphingtools durchgeführt werden. Die Ursprungsgeometrie stammt hier aber stets aus der CAD-Geometrie, die Ergebnisse müssen

demzufolge auch wieder ins CAD zurückgeführt werden. Einen ersten Ausblick geben BACHMANN & NIEDERMEYER [2006], indem sie parametrische CAD-Systeme, in diesem Fall CATIA V5, in die CAE-Optimierungen einbeziehen und damit das Morphing im CAE ersetzen. Dies geschieht am Beispiel einer Frontklappenoptimierung für das Beispiel Fußgängerschutz, welches ein lokales Problem ist, in das relativ wenig Bauteile integriert sind, die Konzeptionierung und Umsetzung solcher Verfahren für komplexe Systeme steht noch aus.

Integrierte Konstruktions- und Berechnungsumgebungen

Eine weitere Möglichkeit der integrierenden Systeme sind die integrierten Konstruktions- und Berechnungsumgebungen, die meist für standardisierte Problemstellungen eingesetzt werden und den Konstrukteur schnell mit den notwendigen Simulationsergebnissen versorgen sollen. Einen Ansatz dafür liefern PLIESKE ET AL [2004], indem sie ein Berechnungsportal für die Berechnung von einfachen Simulationsproblemen in der Getriebeentwicklung vorstellen, das aber über die reine Simulation hinausgeht. PLIESKE ET AL [2004] stellen fest, dass ca. 90% der Zeit für eine Simulation dafür verbraucht wird, die notwendigen Eingangsinformationen zu beschaffen, da jedes Simulationsergebnis von der Qualität der Eingangsdaten abhängt²². Daher werden in dem von ihnen vorgeschlagenen Berechnungsportal weitere Informationen, wie z. B. Normen, Berechnungskataloge, etc. zur Verfügung gestellt, damit der Konstrukteur schnell an die benötigten Eingangsinformationen kommt. Aber auch bei dieser Lösung gilt, dass nur einfache Problemstellungen, wie z. B. Schraubverbindungen, von den Konstrukteuren selbst bearbeitet werden können, für komplexe Probleme bleiben die Spezialisten in der Simulation zuständig.

Ein weiterführender Ansatz ist das Konstruktionssystem *mfk* vom Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Universität Erlangen, das in der Lage ist, in der für den Konstrukteur gewohnten Umgebung Dimensionierungs- und Auswahlberechnungen, Topologie- und Gestaltoptimierungen und FEM-Simulationen zu integrieren [LÖFFEL 1997]. Dabei werden kommerzielle Softwaresysteme, wie z. B. MSC/NASTRAN, in das Konstruktionssystem integriert, wobei auch hier gilt, dass zum einen die Schwierigkeit des Berechnungsproblems begrenzt bleibt, da sonst Spezialisten vonnöten sind, und zum anderen die Akzeptanz der Konstrukteure eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg solcher Lösungen ist. Im Prinzip ist die Arbeit von WÖLFLE [1998] auch zu den integrierten Systemen zu rechnen, indem Berechnungsprobleme klassifiziert werden und der Konstrukteur sich je nach seiner Problemstellung Kompetenzzentren herausuchen kann, die seine Aufgabe abarbeiten. Die Berechnungsverfahren wurden aus dem Gebiet der Auslegung von Antriebs-elementen ausgewählt und systemtechnisch realisiert und sind somit nur bedingt übertragbar auf die Problemstellungen in der Fahrzeugentwicklung.

²² An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Zahlenangaben in der Literatur bzgl. der Beschaffung von Informationen stark schwanken, daher sind an verschiedenen Stellen der Arbeit auch unterschiedliche Zahlen zu lesen (vgl. Kapitel 2.3.2 und 4.3). Dies rührt daher, dass der Prozess der Daten- und Informationsbeschaffung nicht einheitlich definiert werden kann, da er vom Produkt, vom Prozess und nicht zuletzt vom Simulationsproblem selbst abhängig ist. Zu konstatieren ist in jedem Fall, dass der Prozess der Informationsbeschaffung sehr aufwendig ist, gestützt u. a. auf Ergebnisse aus dem in Kapitel 1.3 genannten CAD-CAE-Projekt.

2.3.7 Wissensbasierte Systeme

Eine scharfe Trennung zwischen wissensbasierten Systemen, Features, integrierten Lösungen, Workflows, den Ansätzen mit Agentensystemen und neuronalen Netzen (Kapitel 2.3.8) ist nicht möglich, da alle Lösungen ein gemeinsames Ziel haben: effizient Daten und Informationen zu übertragen, wobei die Informationen dann durch Interpretation und Anwendung in Wissen übergehen. HEYNEN [2001] unterteilt das Berechnungswissen in Methoden-, Prozess- und Produktwissen ein, um die Wissensarten zu strukturieren und im Prozess zur Verfügung stellen zu können. Dabei wird in den von HEYNEN [2001] definierten Phasen des Berechnungsprozesses, Klärung der Aufgabenstellung, Modellerstellung, eigentliche Berechnung und schließlich Ergebnisauswertung, jeweils unterschiedliches, spezielles Wissen benötigt, das über ein Wissensmanagementsystem zur Verfügung gestellt wird, welches wiederum aus laufenden Berechnungsprozessen mit dem Wissen angereichert werden muss. HEYNEN [2001] konzentriert sich dabei auf Wissen innerhalb der Berechnung und weist darauf hin, dass die Schnittstellenverluste vom Konstrukteur zum Berechner am Anfang und vom Berechner zum Konstrukteur am Schluss eine große Rolle spielen. CASCINI ET AL [2002] praktizieren Wissensmanagement, für das es eine ganze Reihe von Definitionen gibt, am Beispiel einer Kunststoffkonstruktion eines Rades. Sie schlagen ein Web-basiertes Wissensportal vor, in dem die relevanten Informationen für eine kunststoffgerechte Konstruktion für den Konstrukteur leicht zu finden sind. Relevante Informationen sind dabei kategorisiert in die Bereiche Konstruktion, Umwelt/Randbedingungen, Montage, Fertigung und den Versuch, wobei die für die Auslegung mit numerischer Simulation wichtigen Informationen im Bereich Konstruktion liegen. Damit wird der Versuch unternommen, das schwer fassbare und verwertbare Wissen aus Quellen wie dem Internet, wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Fachbüchern strukturiert und leicht zugänglich zu machen. Einen auch mit den Erfahrungen aus dem Versuch gekoppelten Ansatz verwenden LUND ET AL [2004], das Grundprinzip ist aber auch auf die CAD-CAE-Integration zu übertragen. Das gewählte Beispiel ist aus der CFD-Simulation zur Motorkühlung eines Fahrzeugs. Die Grundausslegung erfolgt mit einem 1D-Berechnungsmodell für die Kühlluft- und Kältemittelströmung, die wiederum Daten austauschen und mit Parametern aus dem Versuch, aus Erfahrungswerten und mit grundlegenden geometrischen Randbedingungen angereichert werden. Auf Basis der Ergebnisse und mit fortschreitender Entwicklungsdauer werden dann auf Basis von 3D-CAD-Daten 3D-Strömungssimulationen durchgeführt. Das Verfahren steht und fällt mit den Eingangsdaten, die die 1D-Berechnung erhält, so dass ein Wissenstransfer zwischen den Disziplinen Konstruktion, Simulation und Versuch über eine Erfahrungsdatenbank Voraussetzung für den Erfolg des Verfahrens sind. Einen Beitrag zur konstruktiven Auslegung von lärmarmen Produkten liefert GUMMERSBACH [2000] durch die Schaffung eines Kataloginformationssystems, in dem der Konstrukteur in seiner Auswahl von Lösungen hinsichtlich akustischer Eigenschaften unterstützt werden soll. Das Informationssystem entspricht dem prinzipiellen Aufbau nach den Konstruktionskatalogen von ROTH [1994], integriert ist ein Werkzeug für die schalltechnische Analyse, in dem einfache Übertragungsphänomene berechnet werden können. Die Empfehlungen für konstruktive Lösungen zur Vermeidung von unerwünschtem Schall sind im selben System zu finden, es handelt sich also um ein wissensbasiertes System, das Konstruktion und Simulation integriert, das jedoch nur einen funktionalen Aspekt der Bauteilauslegung berücksichtigt und die Simulation bereits in das Konstruktionssystem integriert hat,

eine Integrationslösung für Konstruktion und Simulation in der Fahrzeugentwicklung stellt dies nicht dar.

2.3.8 Weitergehende Forschungs- und Lösungsansätze

Abgesehen von den gängigen Forschungen der vergangenen Jahre auf dem Gebiet der CAx-Werkzeuge und des Datenmanagements gibt es einige weiterführende Ansätze, die der Vollständigkeit halber und vor allem für die Gültigkeit zukünftiger Lösungen betrachtet werden müssen.

Workflows

Obwohl die Entwicklung von Produkten selten der expliziten präskriptiven Form von Workflows gehorcht, schlagen eine Reihe von Autoren die Teilautomatisierung von gewissen Umfängen der Zusammenarbeit von Konstruktion und Berechnung vor. Vor allem die Verteilung von Informationen innerhalb eines Prozessabschnitts, die Vermittlung von Ergebnissen oder Parametern oder der Anstoß von automatisierten Berechnungsaufgaben werden häufig adressiert. Als besonderer Schwerpunkt in Veröffentlichungen mit Bezug zur Automobilindustrie treten dabei deutliche Aktivitäten im Bereich von Datenmanagementsystemen für die Berechnung heraus, die den Simulationsprozess stärker abbilden und automatisieren. So deckt beispielsweise das Datenmanagementsystem CAE-Bench in der Berechnung die Bereiche Solving und Postprocessing ab, wobei die Prozesskette nicht automatisch bis in die Konstruktion reicht, sondern der Berechner seine Ergebnisse systematisiert ablegen kann [REICHENDECKER ET AL 2006]. Eine geschlossene Prozesskette muss der Konstrukteur damit manuell herstellen, was voraussetzt, dass die Ergebnisdatenbank mit einem entsprechenden Filter ausgestattet ist, so dass die benötigten Informationen schnell und aufwandsarm gefunden werden können. Eine Abdeckung der Prozesskette nach vorne, d. h. die Unterstützung des Modellaufbaus in der numerischen Simulation, ist derzeit im Forschungsstadium, wäre aber sehr effektiv, wie in Kapitel 2.3.2 gezeigt.

GOLTZ [2000] definiert den Engineering Workflow als eine Weitergabe von Informationen, die für den Ingenieur von Interesse sind: Designparameter in Form von Gleichungen, Maßen, Werkstoffen, etc., die im Laufe des Designprozesses ausgetauscht werden müssen. Ein solcher Workflow lässt sich natürlich auch auf die Problemstellung CAD-CAE-Integration übertragen, unterscheidet sich aber im Grundprinzip nicht von den Kopplungsverfahren von CAD- und CAE-Systemen, die ebenfalls mit Parameterübergaben arbeiten. MCMAHON ET AL [2003] betonen, dass die Notwendigkeit in der Automobilindustrie Informationen und Daten weiterzugeben, durch die verzweigte Zuliefererstruktur stark gewachsen ist. Daher wird ein Workflow-Management-System (WFMS) vorgeschlagen, das die einzelnen Arbeitsschritte kontrolliert und terminiert, wobei Konstruktion und Simulation nur einzelne Aktivitäten von vielen sind. SEIDEMANN [2001] sieht zwei Hauptschwierigkeiten im Einsatz von Workflowmanagement-Systemen im Produktengineering, also im Produktentwicklungsprozess: erstens die Inkompatibilität von CAx-Systemen, die die prinzipielle Notwendigkeit von PDM-Systemen für das Produktdatenmanagement beweisen, und zweitens der Charakter von Entwicklungsprozessen. Workflows sind für deterministische Prozesse bestens geeignet, für die

generischen Prozesse in der Entwicklung haben sie sich noch nicht durchsetzen können. Generell lässt sich zu den Workflows feststellen, dass die Voraussetzungen für die Integration von Konstruktion und Simulation mittels Workflows, nämlich die Definition von automatisierbaren Prozessbausteinen, für die numerische Simulation von komplexen Produkten mit komplexen Prozessen noch nicht so weit ist, dass hier von einem umfassenden Durchbruch gesprochen werden kann.

Agentensysteme

Typischerweise werden zur Auswertung der Daten Gespräche und der gemeinsame Abgleich innerhalb persönlicher Kommunikationswege wie Besprechungen, E-Mails, etc. vorgeschlagen. Einige Autoren schlagen jedoch auch vor, auf Basis von Expertensystemen, Datenbanken und künstlicher Intelligenz technische Spezifikationen automatisch mit den Berechnungsergebnissen zu vergleichen – dies ist jedoch aktuell nur für einfache geometrische Probleme möglich, wie die Analyse der vorliegenden Forschungsliteratur ergeben hat. GEE [2001] entwirft ein Agentensystem, das die CAD-Konstruktion mit der FEM- und CFD-Simulation koppelt. Die CAD-Daten werden dabei an die FEM-Simulation übergeben, die ein unstrukturiertes Netz definiert, das aber für eine CFD-Simulation nicht tauglich ist, aber automatisiert neu vernetzt wird. Die Softwarewerkzeuge sind autonom, für die FEM-Vernetzung wird beispielsweise der Standardpreprozessor ANSYS verwendet, und werden über Wrapper eingebunden. Das Expertensystem ist in der Lage, aus unvollständigen Eingangsdaten die für eine Simulation notwendigen Informationen zu generieren. Kern der Lösung ist schließlich die automatisierte Simulation, die iterativ ein funktionales Optimum bzgl. Strömungs-, Druck- bzw. Temperaturverteilungen findet. WAGNER & GÖHNER [2005] fordern bei dem Entwurf für Agentensysteme in der Produktentwicklung zur Automatisierung von zuvor manuell getätigter Entwicklungsarbeit die Beachtung der Tatsache, dass diese im Kontext menschlicher Planungs-, Entwurfs- und Steuerungstätigkeiten erfolgt und dem somit Problemlösungskompetenz des Menschen zugrunde liegt. Die Umsetzung des Agentensystems ist im Grundkonzept gleich wie bei GEE [2001]: Standardsoftwarekomponenten werden über Agenten gekoppelt, die aufgeteilt sind in Komponenten-, Aspekt-, Vorgehens- und Wrapperagenten, die jeweils verschiedene Aufgaben übernehmen. Die Agenten bilden über die Manipulierung der Modelle und die Interaktion mit dem Benutzer die Integrationsplattform zwischen den CAx-Werkzeugen, koordinieren Aktivitäten und sichern somit Datenkonsistenz.

Einen Ansatz, der nicht direkt auf die Integration von Konstruktion und Berechnung zielt, aber dennoch darauf übertragbar ist, liefern HAYES & REGLI [2001], indem sie Wissen aus dem Konstruktionsprozess im CAD-Modell speichern, und zwar nicht nur das endgültige Resultat, sondern auch Zwischenschritte und damit die impliziten konstruktiven Randbedingungen explizieren. Um die relevanten konstruktiven Informationen aus dem CAD-Modell zu extrahieren, wird ein Agentensystem verwendet, das über eine Schnittstelle mit dem CAD-System verbunden ist und die Daten dem Konstrukteur über ein Prozessanalyse-Werkzeug wiederum zur Verfügung stellt. Für die CAD-CAE-Integration kann ein solches System zur Übertragung von konstruktiven Informationen und Randbedingungen an die Berechner verwendet werden, z. B. indem dem Berechner auf diesem Wege die Einschränkungen und Freiheiten für mögliche Änderungen mitgeteilt werden. FUJITA & KIKUCHI [2002] beschäftigen

sich mit dem prinzipiellen Problem bei der Entwicklung komplexer Systeme, in diesem Fall die Entwicklung eines Flugzeugs. Das Gesamtsystem ist mehr als die Summe der Teilsysteme, so dass es im Entwicklungsprozess mehr Informationen und Wissen bedarf als lediglich das über Teilsysteme, sondern es müssen Methoden gefunden werden, die eine Integration des Wissens auf der Gesamtsystemebene ermöglichen. Gewählt wird dabei ein mathematischer Ansatz, indem alle benötigten Informationen für den Entwicklungsprozess, wie z. B. Anforderungen, als Variablen definiert werden und die Beziehungen zwischen den Variablen als Funktionen. Damit werden durch Abstraktion der Konstruktionsaufgabe die Voraussetzungen geschaffen, den Ansatz rechnergestützt umzusetzen. Ein Agentensystem übernimmt hier die Aufgabe, den Entwicklungsprozess zu kontrollieren und Informationen zu speichern, zu kontrollieren und zu verteilen. Eine teilautomatisierte Optimierung von Designvariablen im frühen Stadium von Entwicklungsprojekten auf Gesamtsystemebene kann damit durchgeführt werden.

Die Ansätze zur CAD-CAE-Integration mit Unterstützung von Agentensystemen sind noch nicht sehr weit verbreitet, werden aber in Zukunft eine größere Rolle spielen, vor allem was die Teilautomatisierung von bestimmten Abläufen angeht, die unsichtbar vom Benutzer durchgeführt und von Agenten gesteuert werden können. Letztlich geht es darum, welche konstruktiven Entscheidungen in der Produktentwicklung automatisierbar sind und somit dem Konstrukteur bzw. Berechner abgenommen werden können. Agentensysteme werden in Zukunft auch häufiger als Kommunikationsunterstützung für die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit und zwischen Abteilungen firmenintern verwendet, zumal sie offene Systeme bilden, die jederzeit erweiterbar sind [KLEMENT 2005].

Neuronale Netze

Abgeleitet vom biologischen Vorbild der menschlichen bzw. tierischen Nervenzellen wurden seit den achtziger Jahren künstliche neuronale Netze (KNN) entwickelt, die einige wichtige Eigenschaften des biologischen Nervensystems nutzen sollen, wie z. B. Informationsverarbeitung, Assoziativität, Fehlertoleranz, Adaptions- und Lernfähigkeit [TAWIL 1999]. Für die Integration von Konstruktion und Simulation bzw. für die Integration der Simulation in den Entwicklungsprozess können einige dieser Eigenschaften genutzt werden. HEISERER & CHARGIN [2002] verwenden die neuronalen Netze für die Optimierung von Schweißpunktverteilungen in Fahrzeugkarosserien, indem die Karosserie hinsichtlich mehrerer Lastfälle, wie Biegung, Torsion, Querbiegung, untersucht und mit den neuronalen Netzen die Optima ermittelt. Für eine ähnliche Problemstellung, nämlich die Grundauslegung einer Karosserie in den frühen Phasen der Produktentwicklung, in der es gilt, die grundlegenden Parameter zu definieren und zu optimieren²³, verwenden FORSEN & KRESS [2004] neuronale Netze. Damit sollen für Funktionsbereiche, wie in dem gewählten Beispiel für den Frontcrash eines Fahrzeugs, für die sich keine zufrieden stellenden Ersatzmodelle definieren lassen, bereits in frühen Phasen funktionale Aussagen erzielt werden. Entscheidende Bedeutung kommt der Mo-

²³ An dieser Stelle sei angemerkt, dass eine der Hauptschwierigkeiten in der Fahrzeugentwicklung eben die Ermittlung der auslegungsbestimmenden Parameter darstellt, für eine intensive Diskussion dieses Problems sei auf die Kapitel 5 und 6 verwiesen.

dellierung des Ersatzsystems für das als Real-World-System bezeichnete tatsächliche Produkt zu, das entsprechend abstrahiert und mittels mathematischer Methoden beschrieben werden muss. Dem kommt eine Eigenschaft der neuronalen Netze, die Lernfähigkeit und die Sensitivität, zugute, so dass ein eher vages Systemverständnis, wie in frühen Phasen der Entwicklung üblich, ausreicht, um die Eingangsfunktionen und ω -parameter zu definieren. FORSEN & KRESS [2004] definieren als Eingangsgrößen die Crashkonfiguration, das Gesamtfahrzeug, den Motor und das Vorderwagenpackage mit jeweils bestimmten Subparametern und stellen mittels KNN den Zusammenhang zu den Ausgangsparametern A-Säulenverlagerung und der Intrusionen von Fußstütze, Bremspedal und Fußraum her. Der Brückenschlag zur Konstruktion bleibt aber weiterhin im Fokus der Forschung, denn es lassen sich zwar Grobauslegungen von Parametern durchführen, aber die Abbildung vieler lokale Effekte von Bauteilen und Baugruppen, die letztlich zur Erfüllung der geforderten Eigenschaften beitragen, sind nach dem aktuellen Stand der Technik noch nicht möglich.

Ein Ansatz, der nicht in direktem Zusammenhang mit der Integration von Konstruktion und Simulation steht, aber dennoch auch darauf übertragbar ist, ist die Methode von ALBERS & ALBRECHT [2002], die neuronale Netze zur Objektivierbarkeit von Komfortbewertungen, die ja per se subjektiv sind, da jeder Mensch Komfort individuell definiert, verwenden. Eingangsdaten für die KNN bilden dabei die aus Fahrversuchen ermittelten Längsbeschleunigungen im Zeit- sowie im Frequenzbereich, Ausgangsdaten bilden die auf einer stufenlosen Skala abgebildeten Subjektivurteile zum Anfahrkomfort. Die vom KNN ermittelten Werte werden anschließend mit den Bewertungen von „Normalkunden“ verglichen, woraus sich die Güte des KNN ablesen lässt. Bei hinreichend genauer Vorhersagegenauigkeit lassen sich die Werte in die numerische Simulation einspeisen und können dem Konstrukteur und Berechner wertvolle Hinweise und Richtwerte für die Auslegung von Fahrzeugsitzen oder auch anderen, vom subjektiven Urteilsvermögen des Menschen abhängigen, Systemen im Fahrzeug geben. Einen Ansatz, der an die Thematik der Generierung und Wiederverwendung von Wissen anknüpft liefert STRICKER [1996], indem er die Eigenschaften der KNN nutzt, Erfahrungswissen zu speichern. Dabei wird Wissen aus der Simulation und dem Versuch in die KNN eingespeist und zur Auslegung eines Verbrennungsmotors genutzt. Im Rahmen des SPP 732 „Integration von Gestaltung und Berechnung“ ist die Arbeit von CARL [2000] entstanden, indem er neuronale Netze nutzt, um u. a. die numerische Simulation in den Konstruktionsprozess zu integrieren. Dazu verwendet er als Beispiel die Auslegung eines einstufigen Getriebes, das mit dem CAD-System Pro/ENGINEER konstruiert wird und mit dem integrierten FEM-Modul Pro/MECHANICA simuliert wird. Eingangs- und Ausgangsparameter werden definiert und es werden FEM-Berechnungen durchgeführt, die als Lernbasis für die neuronalen Netze dienen. Somit können für die Neuauslegung von Getrieben die FEM-Simulationen als Basis für die ersten geometrischen Entwürfe dienen, die neuronalen Netze können allerdings eine detaillierte Analyse der Konstruktion hinsichtlich Spannungen und Verschiebungen nicht ersetzen.

Die Methode der KNN ist in Zukunft ein geeignetes Mittel, um die Konstruktion und Simulation besser zu unterstützen. Dabei sind vor allem zwei Eigenschaften der KNN wichtig: die Speicherung und damit die Wiederverwendung von Erfahrungswissen und die Generierung von wichtigen Eingangsparametern für die Konstruktion und Simulation zur detaillierteren Auslegung von Bauteilen.

2.4 Transfer von Forschungsergebnissen in die industrielle Praxis

Die vorgestellten Forschungsergebnisse aus dem Stand der Technik sind z. T. gut und z. T. gar nicht in der industriellen Praxis verankert. Viele Lösungen sind jedoch stark fokussiert auf Einzelprobleme und kaum übertragbar. Dies liegt daran, dass die Produktbeispiele oder die zugrunde liegenden Prozesse sehr speziell sind, d. h. für komplexere Problemstellungen, die meist eine Folge von komplexeren Produkten und Prozessen sind, sind viele Lösungen nicht oder nur bedingt anwendbar. Ein wesentlicher Fokus kristallisiert sich bei den Arbeiten zur CAD-CAE-Integration jedoch heraus: Kernfrage ist, wie Daten und Informationen effizient übertragen werden können. Dabei geht es hauptsächlich um die Richtung von der Konstruktion in die Simulation, wenn es um CAD-Daten geht und um das Berechnungswissen und den Transfer von Ergebnissen, wenn es um die andere Richtung geht. Hier liegt ein zweiter Schwerpunkt der Arbeiten zur CAD-CAE-Integration: wie kann Berechnungswissen gespeichert und wieder verwendet werden, indem es dem Konstrukteur oder dem Berechner zur Verfügung gestellt werden kann. Der Speicherung und dem Recycling von Informationen kommt somit für den Berechnungsprozess eine überragende Bedeutung zu, zumal speziell in der Simulation viel wettbewerbsrelevantes Wissen generiert wird.

Viele Ansätze aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz sind noch im Forschungsstadium und werden sehr zögerlich in die Praxis übernommen. Gleichwohl gilt hier, dass sich diese Systeme mit der Zeit durchsetzen werden, da hier ein großes Potential für eine Effizienzsteigerung liegt. Den ersten Schritt muss aber der Mensch, in diesem Fall der Entwicklungsingenieur tun: es müssen für nicht deterministische Prozesse, wie den Entwicklungsprozess, Subprozesse definiert werden, die automatisierbar sind und z. B. von Workflows bzw. Agenten gesteuert und überwacht werden können. Darüber hinaus gilt es zu klären, wiewohl das nicht mehr die Aufgabe des Ingenieurs sein kann, inwieweit die Haftung für das Entwicklungsrisiko beim Ingenieur liegt, wenn nicht mehr Menschen, sondern Maschinen zentrale Designentscheidungen fällen. Die CAx-Werkzeuge sind aus der Produktentwicklung nicht mehr wegzudenken, kein Mensch wäre in einer vertretbaren Zeit in der Lage, nichtlineare Gleichungssysteme beispielsweise einer Crashberechnung eines Fahrzeugs mit ca. 25000 Finiten Elementen zu lösen, jedoch wird in der Literatur immer wieder betont, dass die Unterstützung von CAx-Werkzeugen für frühe Phasen der Entwicklung, wo mit der Kreativität eine der herausragenden menschlichen Eigenschaften gefragt ist, nur unzureichend ist [HÖHNE & BRIX 2003]. Dazu sei an dieser Stelle auf die Arbeit von AMFT [2002] verwiesen, der sich zum Teil mit der Problematik auseinandersetzt, indem er ein Szenario entwirft, in dem der von Menschen gelebte Entwicklungsprozess weitgehend maschinell erledigt wird und der Ingenieur (in diesem Fall nur ein Einzelner, so dass der für konstruktive Entscheidungen so wichtige Dialog wegfällt!) nur noch einige Grundsatzentscheidungen fällt. Letztlich werden Produkte von Menschen und für Menschen entwickelt, CRABB [1998] stellt hierzu fest, nicht die Menschen, sondern die Systeme sind das Problem. Wie in Kapitel 3 zu zeigen sein wird, ist für eine Integration von Teilprozessen eine umfassendere Betrachtung des Problems notwendig.

2.5 Zusammenfassung Kapitel 2

Im zweiten Kapitel wurden die Grundlagen für das Verständnis der Aspekte der Integration von Konstruktion und Simulation in einem komplexen Entwicklungsumfeld mit einem komplexen Produkt wie der Fahrzeugkarosserie, die als Integrator der Gesamtfahrzeugeigenschaften dient und die direkte Schnittstelle zum Kunden darstellt, gelegt. Die rechnerunterstützte Produktentwicklung, vor allem die Teildisziplinen CAD und CAE, bilden die Basis für die Integrationsansätze, die ausführlich als Stand der Forschung und Technik vorgestellt wurden. Von eher praxisnahen und teilweise in der Praxis verankerten Lösungen, wie z. B. die integrierenden Systeme, bis zu den visionären und zukunftsgerichteten Ansätzen z. B. in Form von neuronalen Netzen, wurde gezeigt, dass der Stand der Forschung und Technik sehr breit gefächert ist. Bei der Analyse wird aber deutlich, dass viele Lösungen nicht übertragbar sind auf andere Problemstellungen und nicht skalierbar sind für komplexere Probleme, wie sie in der Fahrzeugentwicklung an der Tagesordnung sind. Außerdem ist die IT-Landschaft nach wie vor von Brüchen gekennzeichnet, die sich, wie z. B. die zähe Einführung von STEP zeigt, in der industriellen Praxis auch noch lange halten werden, schon allein deshalb, weil das Interesse der kommerziellen Software-Anbieter an einer Integrationslösung sehr gering ist.

Daher wird im weiteren Verlauf der Arbeit gezeigt, dass das Problem der Integration von Teilprozessen breiter angelegt werden muss, als dies bisher praktiziert wurde, um die beiden wichtigen Kernprozesse der virtuellen Produktentwicklung, die Konstruktion und die numerische Simulation, stärker zu vernetzen.

3. Ansätze zur ganzheitlichen Integration von Konstruktion und Simulation

Der in Kapitel 2 gezeigte Stand der Technik und die Komplexität des Problems kombiniert mit der sich verändernden Rolle²⁴ der Simulation im Entwicklungsprozess lassen eine singuläre Betrachtung von Einzelproblemen bei der Integration von Konstruktion und Simulation nicht mehr zu. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein umfassender, nicht ausschließlich technisch orientierter Ansatz zur Integration postuliert. Im folgenden Kapitel wird dieser Ansatz einer ganzheitlichen Betrachtung und Analyse des Problems der Integration von Konstruktion und Simulation dargestellt und diskutiert. Der Handlungsbedarf wird durch Anwenderbefragungen unter Ingenieuren aus der Konstruktion und Simulation deutlich gemacht und anschließend werden auf dieser Basis die Problemdimensionen der CAD-CAE-Integration aufgezeigt. In den einzelnen Dimensionen werden die detaillierten Problemstellungen erläutert und ein verknüpftes Problemsystem daraus entwickelt, das den Einzelaspekten der Integration Rechnung trägt.

3.1 Ergebnisse von Anwenderbefragungen

Im Rahmen des CAD-CAE-Integrationsprojektes wurden zwei Anwenderbefragungen durchgeführt, die eine detaillierte Problemanalyse zum Ziel hatten. Dabei handelt es sich zuerst um einen Fragebogen und dann um eine detailliertere Analyse im Rahmen einer Kommunikationsstudie zum Aufzeigen von Handlungsbedarfen in der Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Simulation.

3.1.1 Fragebogen zur Zusammenarbeit von Konstruktion und Simulation

Adressiert werden mit dem Fragebogen²⁵ Ingenieure aus den Bereichen Konstruktion und Simulation in der Karosserieentwicklung sowohl bei mehreren OEM als auch bei Dienstleistern und Zulieferern. Von 53 zurückgesandten Fragebogen waren 49 auswertbar, was einer sehr guten statistischen Basis entspricht. Zu Beginn des Fragebogens wurde nach

²⁴ GOLTZ [2003] definiert im Rahmen des Engineering Workflow fünf unterschiedliche Benutzerkategorien, die Rollen gleichzusetzen sind: Bearbeiter (technische Verantwortung), Beteiligter (aktive Beteiligung), Prüfer (Prüfung der Auswirkungen des Entwicklungsergebnisses auf eigene Tätigkeit), Abonnent (passiv im Informationsfluss) und Gesamtverantwortlicher (Freigabeverantwortung). Übertragen auf die Kernthematik der CAD-CAE-Integration sei diese Definition von Rollen übernommen.

²⁵ Der Fragebogen ist in Kapitel 9.1 vollständig abgedruckt, die Ergebnisse sind z. T. aus Veröffentlichungen [KREIMEYER 2006B] bzw. aus der vorliegenden Arbeit zu entnehmen.

dem spezifischen Einsatz von CAx-Werkzeugen, Datenmanagement und dem Entwicklungsprozess im Allgemeinen gefragt, bevor die Konstrukteure und Simulationsingenieure getrennt befragt wurden, wo und wie die hauptsächlichen Problemfelder in der Zusammenarbeit gesehen werden. In freien Textfeldern hatten die Befragten die Möglichkeit, ihre Antwort zu detaillieren oder zu ergänzen und somit Hinweise über die Frage hinaus zu geben.

Das primäre Ziel der Umfrage war es, einen besseren Einblick in die Qualität und die Effizienz der Zusammenarbeit beider Disziplinen zu erlangen. Wegen der Komplexität des Problems kann das detaillierte Verständnis bereits als wichtiger Schritt in Richtung hin zur Problemlösung angesehen werden. Der Blick des Anwenders auf ein Problem ist das Wichtigste, was bei der Veränderung gegenwärtiger industrieller Prozesse zu beachten ist, da er es ist, der mit der letztendlichen Lösung arbeiten muss. Daher ist es das zentrale Ziel, das Problem mit den Augen des Nutzers zu betrachten und eine Lösung von akademischer Seite zu bieten. Unter den Befragten, deren Fragebögen in der Auswertung berücksichtigt werden konnten, befanden sich 33 Ingenieure aus dem Bereich der Karosseriekonstruktion, und 16 aus der Simulation. Die Befragten unterteilen sich nach schwerpunktmäßiger Tätigkeit im Entwicklungsprozess wie folgt: über 50% der Konstrukteure sind in der Serienentwicklung tätig, der Rest in der Vor- bzw. Konzeptentwicklung während in der Simulation diese Tätigkeit etwa zwei Drittel ausmacht. Dies ist auch keine Überraschung, denn hier zeigt sich bereits ein geändertes Verständnis der Simulation in der Produktentwicklung als konzeptrelevanter Beteiligter an der Produktenstehung. Die Befragten stammen aus unterschiedlichen Hierarchieebenen, so dass nicht nur die Perspektive der Anwender direkt, sondern auch des verantwortlichen Managements mit erfasst wird.

Die Zusammenarbeit von Konstruktion und Berechnung

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse des Fragebogens bezüglich der Zusammenarbeit von Konstruktion und Simulation dargestellt.

3.1.1.1 Verantwortlichkeiten in der Produktentwicklung

In der Literatur und Forschung gibt es wenige Abhandlungen über die Verantwortlichkeiten hinsichtlich der funktionalen Zielerreichung des Produktes bzw. von Baugruppen und Komponenten. Konstruktion und Berechnung arbeiten zwar an einem gemeinsamen Produkt, die Ansichten über die Verantwortlichkeiten gehen jedoch stark auseinander, wie in Abbildung 3-1 dargestellt. Die Konstruktion trägt hierbei die Hauptverantwortung und wenn man davon ausgeht, dass Verantwortung nicht teilbar ist, dann trägt sie somit die alleinige Verantwortung über den gesamten Entwicklungsprozess. Die Simulation ist nur phasenweise an der Verantwortung beteiligt und spielt dadurch auch über den gesamten Prozess hinweg wieder eher die Rolle des Unterstützers in bestimmten Prozessphasen, was den Möglichkeiten und Ansprüchen der Simulation widerspricht. Allgemein wurde jedoch festgehalten, dass die Ausprägung des fertigen Produktes letztlich in der Verantwortung aller im Unternehmen Beteiligten sei. Die Schlüsselrolle der Karosseriekonstruktion ist jedoch gleichermaßen auf der Produktebene wie der Modulebene klar zu erkennen, da ihr die größte Verantwortung zugesprochen wird. Die Simulationsabteilung ist in der Position zu entscheiden, ob die Funktionalität gemäß der Spezifikationen erfüllt ist. Allerdings findet sich dies insofern nicht vollständig in der Realität

wieder, da der Simulationsabteilung nur teilweise diese Entscheidungsgewalt zugeteilt wird. Daher sollte ihr in Entscheidungsprozessen mehr Einfluss gewährt werden. Interessanterweise wurden bei diesem Thema von Konstruktion und Simulation identische Antworten gegeben. Die Antworten auf der Baugruppen- bzw. Komponentenebene unterscheiden sich nicht wesentlich, hier ist nur auffällig, dass der Konstruktion der überwältigende Anteil der Verantwortung zugestanden wird, wie in Abbildung 3-1 zu sehen ist.

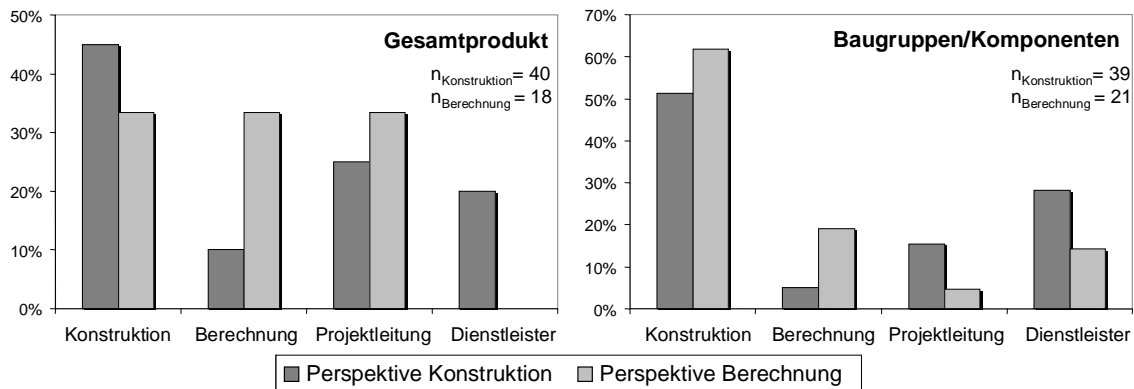


Abbildung 3-1: Verantwortlichkeit für die Implementierung von funktionalen Anforderungen für das Gesamtprodukt und Baugruppen²⁶

Diese global undeutlich festgelegte Verantwortlichkeit für das Produkt und seine Bestandteile führt dazu, dass viele Ingenieure die Möglichkeit fürchten, über ihre Kompetenz hinaus verantwortlich gemacht zu werden. Daher sind transparente Strukturen und Zielvereinbarungen zwingend nötig, um alle im Entwicklungsprozess involvierten Mitarbeiter mit klaren Aufgaben auszustatten, und durch Transparenz sicherzustellen, die Entscheidungsstrukturen und Delegierungsverfahren nachvollziehbar zu gestalten. Als zentrales Problem bleibt das allgemeine Verständnis, dass „Karosserie-Konstrukteure verantwortlich sind für die Gestalt eines Bauteils, Simulationsexperten für dessen Funktionalität“, wie oftmals innerhalb der Umfrage geäußert wurde. Hier manifestieren sich die unterschiedlichen Sichten auf das Produkt, die komponenten- und die funktionsorientierte, auf die in Kapitel 5 intensiver einzugehen sein wird. Das Hauptziel der CAD-CAE-Integration muss daher sein, eine intuitive Verbindung von Bauteilen und Eigenschaften bzw. Funktionen in einer allgemein akzeptierten Struktur zu schaffen. Dabei muss Transparenz in den Informationsflüssen geschaffen werden und es müssen klare Zuordnungen von Komponenten und funktionalen Eigenschaften möglich gemacht werden. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Konstruktion eher eine koordinie-

²⁶ Die Anzahl n der Antworten entspricht nicht bei jeder Frage der Anzahl der Teilnehmer. Dies liegt daran, dass bei einigen Fragen Mehrfachnennungen möglich sind, siehe dazu den Fragebogen in Kapitel 9.1. Ist n größer als die Anzahl der Teilnehmer (49), so entspricht n der Zahl der Nennungen.

rende Rolle einnimmt und eher bauteilorientiert arbeitet, während die Simulation als Anregung für Kreativität und Freiräume verstanden wird und als überprüfende Instanz, deren Ziel aber die Erfüllung von Anforderungen ist. Dies deckt sich auch mit der Rolle, die dem Konstrukteur in der Literatur und Forschung zugeordnet wird (siehe Abbildung 2-3), wenngleich die Simulation sich in ihrer Rolle langsam emanzipiert und ihrer Wichtigkeit gemäß Anerkennung findet.

3.1.1.1.2 Initiatoren der Produktentwicklung

Die Rolle der Simulation als Ergänzung der Konstruktion in den frühen Phasen der Produktentwicklung wird in der Konstruktionslehre nicht ganz einheitlich gesehen: nach KOLLER [1998] können Produkte erst dimensioniert und damit berechnet werden, wenn ihre qualitativen Parameterwerte und somit ihre Gestalt feststeht, während PAHL & BEITZ [2003] die Simulation bereits sehr früh zur Auswahl und Bewertung von Wirkprinzipien einbeziehen, wie in Kapitel 2.3.1 erläutert. LINDEMANN [2007] schlägt für die frühe Phase, wenn noch keine ausreichenden Daten für eine numerische Berechnung vorliegen, Versuche zur grundlegenden Eigenschaftserkennung vor. Dies spiegelt sich auch in der Industrie wider, wie die Umfrageergebnisse bezüglich der Initiative in der Produktentwicklung, in diesem Fall der Fahrzeugentwicklung, zeigen. Die Konstruktion und die Simulation haben je nach Phase und Produktumfang (Gesamtfahrzeug – Baugruppe – Komponente) unterschiedliche Rollen und Verantwortungen, so dass sich die Aussagen schwer interpretieren lassen. Insgesamt zeigt sich, dass die Konstruktion zwar startet, die Simulation aber bereits sehr früh beteiligt ist und erste Auslegungsrechnungen durchführt. Nach ersten Packageauslegungen und der Definition der Gesamtfahrzeugeigenschaften und der Zielmärkte kann mit ersten Grobdimensionierungen in der Simulation begonnen werden. Die nach den Antworten der Anwender sinnvolle Reihenfolge ist eine erste Auslegungsrechnung, anschließend eine detailliertere Konstruktion, die einer Kontrollrechnung unterzogen wird und schließlich validiert werden kann. Die Geometrie für die Simulation ist, wie oben erwähnt, in frühen Phasen nur unzureichend oder gar nicht vorhanden, da eine CAD-Konstruktion oft zu aufwändig ist und vor allem einem hochfrequenten Änderungszyklus unterworfen ist. Die Modelle für die Simulation stammen zu etwa zwei Dritteln aus Vorgängerprojekten, die in der Simulation entsprechend skaliert werden, oder aus in der Simulation erzeugten Geometrien.

3.1.1.1.3 Eingesetzte Werkzeuge in der Karosserieentwicklung

In Kapitel 2 hat sich die sehr heterogene Systemlandschaft im Bereich der Konstruktion und Simulation gezeigt, was sich auch in der Anwenderanalyse widerspiegelt. Drei verschiedenen CAD-Systemen stehen acht IT-Werkzeuge der Berechnung gegenüber, für Preprocessing, Solving und Postprocessing. Auf Seiten der Werkzeuge kann somit schwerlich von integrativen Lösungen zwischen Konstruktion und Simulation gesprochen werden, zudem wird der Trend zur Spezialisierung der Anwender eher gefördert denn behindert. Eine Möglichkeit zur Werkzeugintegration ist die in Kapitel 2.3.6 beschriebene konstruktionsnahe FE-Analyse, die für schnelle und rein qualitative Aussagen für Probleme geringer Komplexität hilfreich sein kann und Vergleiche zwischen konkurrierenden Konzepten ermöglicht, dabei aber weniger Zeit in Anspruch nimmt als eine aufwendige komplette FE-Simulation. Die in der Befragung erhaltenen Aussagen sind ein klares Indiz für zu lange Berechnungsdurchläufe; trotz man-

gelnder Fachkenntnisse in den Berechnungsdisziplinen und einem erhöhten zu erwartenden Aufwand im Alltagsgeschäft hält ein Großteil der befragten Konstrukteure die Verwendung von konstruktionsnahen FEM-Systemen für sinnvoll, ca. 60%, besonders mit dem Ziel von konstruktionsnahen, immediat verfügbaren Berechnungssystemen für Vorauslegungen. Aktuell werden CAD-interne Berechnungsprogramme jedoch kaum genutzt, besonders weil sie zu wenig entwickelt sind und nur geringen Funktionsumfang bieten. Zudem fehlt spezielles Know-how in der Bedienung der Systeme und der Interpretation der Simulationsergebnisse.

3.1.1.1.4 Informationsmanagement im Entwicklungsprozess zwischen Konstruktion und Simulation

Für die Simulation eines Fahrzeuges bzw. der relevanten Baugruppen ist eine Vielzahl an Informationen aus den unterschiedlichsten Quellen notwendig, die weit über die reinen CAD-Daten hinausreichen (siehe Abbildung 2-23). GERHARD [2000] betont, dass zwar 25% der Arbeitszeit von Entwicklern für die Informationsbeschaffung benötigt wird und nach der VDI-RICHTLINIE 2211 [1980] sich die zu berücksichtigende Menge an Informationen alle fünf Jahre verdoppelt, was die Beschaffung der wichtigen und richtigen Informationen und Daten zusätzlich erschwert, gleichzeitig aber die meisten Informationen nicht standardisiert und in elektronischer als auch in Papierform vorliegen. Dies ist auch eine Schwierigkeit im Konstruktions- und Simulationsprozess, wie das Ergebnis der Umfrage an dieser Stelle zeigt. Die Informationsversorgung ist generell unzureichend, dies wird von der Konstruktion und der Simulation gleichermaßen so gesehen. Folge ist, dass dadurch auch schlechtere Ergebnisse erzielt werden, was ein enormes Potential zur Effizienzsteigerung erwarten lässt. In Abbildung 3-2 sind die Ergebnisse der Umfrage dargestellt und es zeigt sich, dass fast zwei Drittel der Konstruktionsingenieure der Meinung sind, dass die Simulation nicht mit den ausreichenden Informationen versorgt ist und davon der größte Teil dann der Simulation eine schlechtere Ergebnisqualität unterstellt. Die Berechnungsperspektive ist noch drastischer. Eine mögliche Ursache ist sicher, dass die Konstruktion oft nicht genau weiß, welche Informationen von der Berechnung benötigt werden.

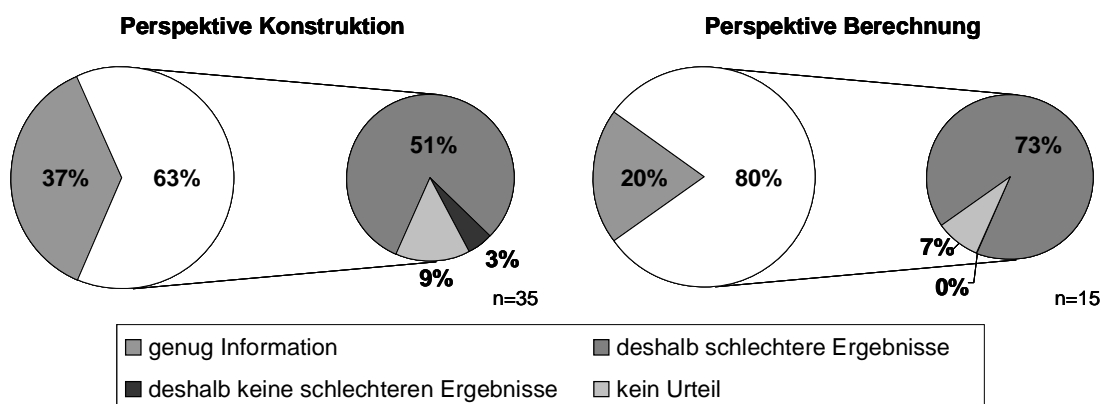


Abbildung 3-2: Qualitative Schätzung der Informationsversorgung der Berechnung aus Anwendersicht und davon abhängige Ergebnisqualität

Während in Richtung Konstruktion zur Simulation Informationen zum Modellaufbau, Randbedingungen wie Package, Termine, etc. fließen, kommen die Ergebnisse der Simulationen von der Berechnung zurück in die Konstruktion und müssen dort in die Bauteilgeometrie oder andere Parameter wie Füge-technik, Werkstoff, etc. eingearbeitet werden. In der Literatur wird diese Frage so gut wie gar nicht und wenn nur am Rande behandelt, hier steht der Konstrukteur im Mittelpunkt und muss möglichst gut mit Simulationssystemen und -verfahren vertraut gemacht werden, vgl. LÖFFEL [1997], PLIESKE ET AL [2004]. Die Rolle und Möglichkeiten der Simulation werden dadurch aber völlig ausgeblendet, was einer Integration von Konstruktion und Simulation nur schwerlich gerecht wird. In der Umfrage wurde das Thema der Rückführung von Simulationsergebnissen in die Konstruktion aus zwei Perspektiven befragt: aus der der Konstruktion und aus der der Simulation. Auf globalem Niveau ohne Trennung nach Disziplinen ist auffällig, dass fast keine übereinstimmende Nennung von Medien und Vorgehensweisen existiert. Dies deutet auf individuelle, nicht harmonisierte bzw. standardisierte Übertragung von Ergebnissen hin. Die Berechnung bevorzugt es, die Ergebnisse der Berechnung vor allem in schriftlicher Form zu übermitteln. Absprachen nehmen tendenziell einen geringen Stellenwert ein. Oft wird die reine Übermittlung einer Präsentation oder eines schriftlichen Berichts als ausreichend betrachtet. Zudem spielen Berechnungsdaten eine große Rolle; dies umfasst insbesondere Werte (z. B. HIC) und Wertetabellen (s. Abbildung 3-3). Auf Seiten der Konstruktion nehmen Absprachen einen großen Stellenwert ein, wie in Abbildung 3-3 dargestellt. Die Konstruktion in der Karosserienentwicklung, wie in Abbildung 2-3 dargestellt, ist eher koordinierend ausgerichtet und folglich deutlich mehr in Besprechungen und Regelterminen eingebunden als dies bei der Berechnung der Fall ist.

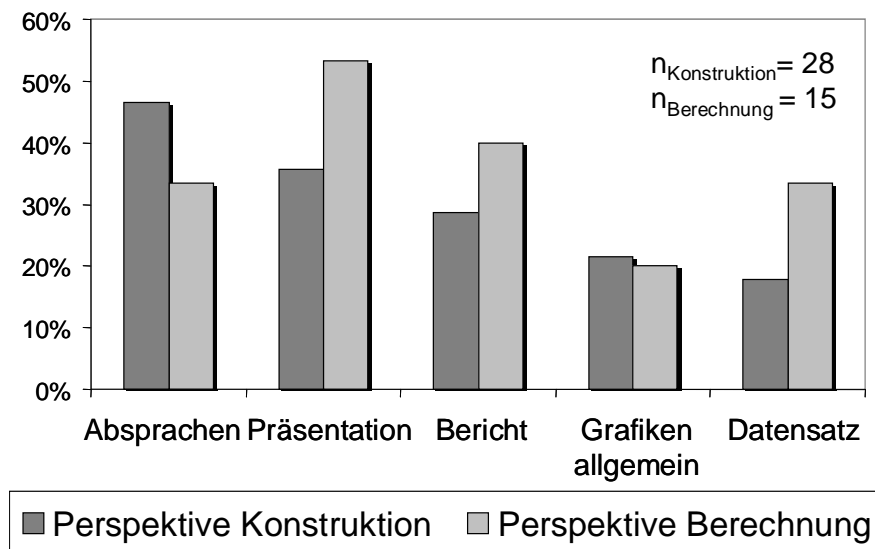


Abbildung 3-3: Angaben der verwendeten Formen der Übermittlung der Berechnungsergebnisse aus Perspektive der Simulation und der Konstruktion

Die übertragenen Daten und Informationen haben unterschiedliche Ausprägungen, wie in Tabelle 3-1 gezeigt wird. Eine geringe Rolle spielen nach wie vor übertragene CAE-Daten

von der Berechnung in die Konstruktion, da sie ohnehin nachkonstruiert und nicht direkt verwendet werden können. Es ist aber deutlich zu erkennen, dass es ein standardisiertes Vorgehen nicht gibt, sondern es sehr viele verschiedene Wege und Medien zur Informationsübertragung gibt, die auch sehr stark von den jeweiligen Gewohnheiten und Vorlieben der Anwender abhängen.

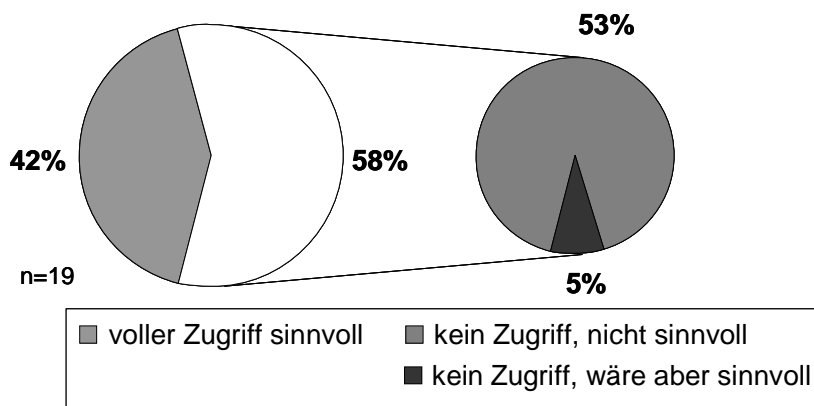
Absprachen	Präsentation	Bericht	Grafiken	Datensatz
<ul style="list-style-type: none"> • Gemeinsame Auswertung • Beurteilung am Bildschirm • Absprachen • Besprechungen • persönliche Erläuterungen • Gespräche am CAD • Auslegungsrunden • Email • Vorschläge 	<ul style="list-style-type: none"> • Powerpoint • HTML Datei 	<ul style="list-style-type: none"> • Statusbericht • detaillierter Bericht • Standardreport • Bericht für Dokumentation • Protokolle • Kurzbericht • technische Berichte • Berechnungsberichte 	<ul style="list-style-type: none"> • Animationen • Bild • Film • bewegte Simulation • Schwingungsmodi • Farbige Kraftverläufe o.ä. 	<ul style="list-style-type: none"> • Werte • Datenmodelle • CAD-Dateien • berechnete Werte im Vergleich zum Target

Tabelle 3-1: Unterschiedliche Kategorien und Medien zur Ergebnisübermittlung von der Berechnung an die Konstruktion

Gemeinsam aus Sicht der Konstruktion als auch der Simulation wird die Notwendigkeit der Kommunikation in Form von Absprachen und Abstimmungen allgemein jedoch unterstrichen, umfangreiche Dokumentationen dienen schwerpunktmäßig der Archivierung und damit auch der Nachvollziehbarkeit in späteren Projektphasen. Die Übertragung von Simulationsergebnissen, insbesondere von optimierten Varianten aus den CAE-Systemen, wird als ein sehr wichtiger Punkt, natürlich besonders von der Konstruktion, gesehen. Gut die Hälfte der Konstrukteure versteht die optimierte Geometrie aus der Simulation als Anregung für eine Nachkonstruktion, gleichzeitig halten jedoch 76% eine direkte Weiterverwendung von Simulationsergebnissen für sinnvoll. Dies zeugt allerdings von einer gewissen Unkenntnis des Simulationsprozesses und einer Überschätzung der Möglichkeiten der Geometriemodellierung der CAE-Systeme. Dazu kommt, dass die Änderungen der Geometrie auf Vorschläge der Simulation meist nicht vollständig möglich ist, da im Sinne des Design for X die Funktion nur eine von mehreren Hauptforderungen an das Produkt ist [EHRENSPIEL 2003]. Es zeigt sich im Rahmen der Umfrage, dass der richtige Umgang mit Ergebnissen aus der numerischen Simulation, zumal bei steigender Produkt- und Prozesskomplexität, nach wie vor eine der Hauptschwierigkeiten im Konstruktions-Simulationsprozess darstellen.

Ein auch in der Literatur häufig adressiertes Problem ist das Datenmanagement zwischen Konstruktion und Simulation. Dabei gilt es stets zu beachten, dass die Charakteristik der Daten und ihr Informationsgehalt bzw. ihre Nutzer sehr unterschiedlich sind: eine Simulationsdatenbank ist für einen kleineren Nutzerkreis und stellt eher eine Wissensdatenbank dar, in der die Simulationen und ihre Varianten abgelegt werden können und die keinen kontinuierlichen Modellabgleich mit dem aktuellen Aufbauzustand des Fahrzeugs machen sollte, da die

Variantenbewertung und -optimierung im Fokus steht [SCHLENKRICH ET AL 2000]. Eine gemeinsame Datenhaltung von Konstruktion und Simulation ist auch aufgrund der riesigen Datenmenge, die bei der Berechnung anfällt und auch wegen der Heterogenität der Simulation per se nicht sinnvoll möglich [IRRGANG ET AL 1996]. Dies wird auch von den Anwendern bei der Befragung so bestätigt. Wenn es sich um gemeinsame Datenhaltung handelt, ist damit gemeint, dass die Simulation Zugriff erhält auf die Daten der Konstruktion. Problematisch dabei wird von den Anwendern die Tatsache gesehen, dass sich die CAD- und CAE-Modelle nicht eindeutig zuordnen lassen, was dazu führen kann, dass falsche Bauteilstände geändert werden. Damit ist auch die Problematik des Informationsaustausches von Simulationsergebnissen beinhaltet. In Abbildung 3-4 ist dargestellt, dass nur 58% der Berechner den Konstrukteuren vollen Zugriff auf ihre Berechnungsergebnisse geben und dies auch nicht für sinnvoll halten. Aus der Perspektive der Konstruktion mit der ihr inhärenten Rolle bedeutet das, dass ihr viele Informationen verloren gehen. Sinnvoll wäre an dieser Stelle den Konstrukteuren einen detaillierteren Einblick in die Simulationsergebnisse zu geben und somit das Verständnis in der Zusammenarbeit zu fördern.

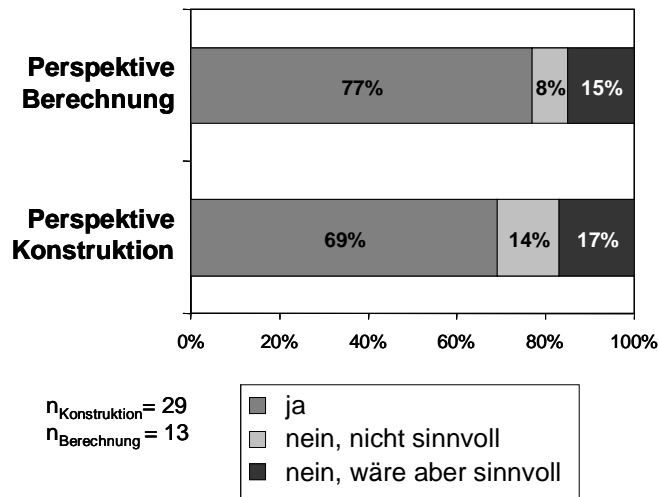


(Beispiel zum Lesen: 58% aller befragten Berechner gewähren der Konstruktion keinen vollen Zugriff auf ihre Berechnungsergebnisse, 5% von diesen hielten es aber für sinnvoll)

Abbildung 3-4: Gewährung vollen Zugriffs der Konstruktion auf die Berechnungsergebnisse

Die Aufbereitung der Geometrie spielt für die Simulation eine große Rolle im Entwicklungsprozess, der Informationsgehalt von CAD- und CAE-Modellen ist, wie in Kapitel 2.3.2 bereits erläutert, höchst unterschiedlich, so dass die Simulation einen erheblichen Aufwand in die Modellerstellung investieren muss. Da die Simulation auch keine so detaillierten CAD-Modelle benötigt, vor allem in frühen Phasen der Entwicklung, ist es im Sinne einer frühen Ergebnisaussage von der Simulation auch erwünscht, früh weniger ausgearbeitete CAD-Modelle zu erhalten, um bereits erste Berechnungen durchführen zu können. Die Differenz, wie sie in den Graphiken (vgl. Abbildung 3-5) zu erkennen ist, deutet auf ein unterschiedliches Verständnis des Vorgehens bei der Berechnung hin, auch wenn die Unterschiede gering ausfallen. Während aus Sicht der Konstruktion die Modelle die Rahmenbedingungen ausrei-

chend erfüllen, sind sie aus Sicht der Simulationsbetreuer noch unzureichend. Der Unterschied im Verständnis ist also ein Indiz für nicht ausreichend aufbereitete Geometriemodelle seitens der Konstruktionsabteilungen vor der Weitergabe an die Berechnung.



(Beispiel zum Lesen: von allen befragten Konstrukteuren übergeben 69% ihre weniger detaillierten Geometrien an die Berechnung, 31% tun dies nicht; in etwa die Hälfte von diesen (17% aller Konstrukteure) hielten dies aber für sinnvoll)

Abbildung 3-5: Übergabe weniger detaillierter Geometrien an die Berechnung in der frühen Phase

In Verbindung mit der Frage zur Informationsversorgung der Berechnungsabteilungen lässt dies auf unzureichendes Verständnis der Informationsbedürfnisse seitens der Konstruktion schließen. Diese zielgerichtete Zusammenstellung, Filterung und Anpassung von Informations- und Datenumfängen ist daher von unmittelbarem Einfluss für eine effiziente Zusammenarbeit, d. h. eine erfolgreiche CAD-CAE-Integration ist nicht nur eine Problematik der Ergebnissrückführung.

Fazit aus der Befragung zum Informationstransfer zwischen Konstruktion und Simulation ist, dass ein erfolgreiches und effizientes Informationsmanagement hohe Potentiale für die Integration von Konstruktion und Simulation bietet und somit auch Voraussetzung dafür ist.

3.1.1.1.5 Geometrieverarbeitung und -bearbeitung in der Simulation

Wie oben bereits erwähnt muss die CAD-Geometrie vor ihrer Weiterverwendung in der Simulation noch angepasst werden. Dabei gibt es unterschiedliche Perspektiven: die Konstruktion versteht darunter eine Überprüfung der Geometrie auf Stimmigkeit, Kollisionsfreiheit und Flächenqualität, für die Simulation steht eine der Berechnungsaufgabe angepasste Detaillierung der Modelle im Vordergrund. Nach TARATOUKHINE & BECHKOUM [1999] wachsen die Anstrengungen auf dem Forschungsgebiet des Knowledge-Based-Engineerings (KBE) als einem Teilgebiet der künstlichen Intelligenz (AI), mit dem Ziel, automatische oder halbautomatische Lösungen für bestimmte Probleme zur Verfügung zu stellen. Dabei ist aber eine gewisse Skepsis der Ingenieure gegenüber solchen automatisierten Prozessschritten nach wie

vor spürbar, vor allem weil die Funktion selten ohne manuellen Eingriff gewährleistet ist, da Inkonsistenzen von den Systemen nach wie vor nur unzureichend erkannt werden [TARATOUKHINE & BECHKOUM 1999]. In der Umfrage hat sich dies auch bestätigt: obwohl KBE-Methoden den Prozess der Geometrieaufbereitung wirksam unterstützen könnten, werden sie bislang kaum genutzt, jedoch für die Zukunft als große Chance gesehen. Die Frage dabei ist jedoch, wie hoch der Aufwand ist, der in die Anreicherung der CAx-Modelle mit KBE gesteckt werden muss. Derzeit – und auch für eine umfangreichere KBE-Implementierung – sind CAD-Kenntnisse in Berechnungsabteilung bzgl. der Geometrieaufbereitung und der notwendigen Modifikationen nötig, die meist durch die Berechnung selbst erfolgen. Eine Vorverlagerung von Teilen dieser Aufgaben in die Konstruktion könnte in der Berechnung die nötigen Ressourcen für eine intensivere funktionale Überprüfung sicherstellen. Dafür wäre jedoch auf Seiten der Konstruktion ein detailliertes Verständnis der Informations- und Modellierungsanforderungen nötig.

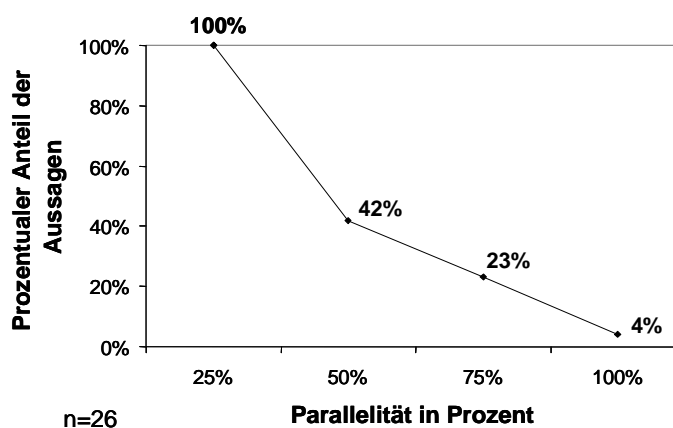
Nach BEUTNER ET AL [1998] ist die Rolle und Charakteristik der Berechnung in der virtuellen Produktentwicklung unter anderem vor allem gekennzeichnet durch frühzeitige und voraussehlende Bereitstellung von Simulationsergebnissen und einer wesentlich stärkeren Mitwirkung und damit Gestaltung der Simulation im Entwicklungsprozess. Dies beinhaltet auch, dass die Berechnung Einfluss nimmt auf die Gestaltung der Geometrie und Varianten der Geometrie in der Simulation erzeugt. In der Umfrage hat sich jedoch gezeigt, dass die Varianten von der Konstruktion kaum eingefordert werden, jedoch sehr häufig in der Simulation erzeugt werden. Hier liegt ein hohes Potential, den Design-for-X-Gedanken in der Simulation zusammen mit der Konstruktion zu verstärken, d. h. ein gemeinsames Zielverständnis aufzubauen und die Simulation stärker in den Gesamtoptimierungsprozess einzubinden. Unterschieden werden muss hier zwischen der Konzept- und Serienentwicklungsphase: während in der Konzeptentwicklung die Geometrie noch keine so große Rolle spielt und dementsprechend großen topologischen Änderungen unterworfen ist, um funktionale Ziele, nicht nur aus der numerischen Simulation, zu erreichen, ist die geometrische Gestalt in der Serienentwicklung weitgehend festgelegt und es sind nur noch Detailänderungen möglich. So ist die Erstellung von Varianten in der Simulation über den Prozess relativ zur Anzahl der Bauteile abnehmend und die Anzahl der Varianten in der Konstruktion nimmt zu, die dann in der Simulation bewertet werden.

Potentiale der Zusammenarbeit von Konstruktion und Simulation im Entwicklungsprozess

Aufbauend auf den Fragen nach dem Status Quo der Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Berechnung ist die logische Konsequenz, die Anwender nach Möglichkeiten der Effizienzsteigerung zu befragen. Dabei ist dann zu unterscheiden, ob es sich um kurz-, mittel- oder langfristige Potentiale handelt, in jedem Fall lässt sich daraus jedoch Forschungs- und Handlungsbedarf ableiten.

3.1.1.1.6 Simultaneous Engineering in der Zusammenarbeit von Konstruktion und Simulation

Obwohl das Simultaneous Engineering (SE) nach EHRENSPIEL [2003] und PAHL & BEITZ [1997] in den Unternehmen, insbesondere der Automobilindustrie, fest verankert ist und einen wesentlichen Beitrag leistet zur Verkürzung der Entwicklungsprozesse, beantworten immer noch rund 50% der befragten Konstrukteure und Simulationsingenieure ihre Arbeit als nicht simultan, wie in Abbildung 3-6 deutlich wird. Dies kann z. T. sicherlich damit begründet werden, dass zwar simultan gearbeitet wird, jedoch selten am selben Entwicklungsstand. In der Konzeptphase sind die Berechnungsingenieure eher diejenigen, die die Führungsrolle innehaben, während die Rolle sich in der Serienentwicklung mit der Konstruktion vertauscht, wie bereits in Kapitel 3.1.1.2 dargestellt. In der Serienentwicklung gibt es auch stets einen zeitlichen Versatz zwischen den Baustufen, so ist z. B. die Rohkarosseriekonstruktion üblicherweise vor dem Interieur fertig [MARKWORTH 2003]. Eine echte simultane Arbeit kann es folglich nach dem Stand der Technik nicht geben, da die Prozessbeteiligten jeweils phasenabhängig in verschiedene Rollen agieren bzw. reagieren. Klar ist aber auch, dass die Parallelität der Arbeit durch schnellere Durchlaufzeiten in der Konstruktion und Simulation noch erheblich gesteigert werden kann, wobei hier bereits, z. B. in der Crashberechnung, gewaltige Fortschritte durch die Verwendung der gleichen Modelle für verschiedene Lastfälle und die Verkürzung der Rechenzeiten erzielt wurden, es aber nach wie vor erheblichen Bedarf auf dem Gebiet der multidisziplinären Optimierung gibt [SCHUMACHER ET AL 2000].



(Beispiel zum Lesen: ca. 4% aller befragten Ingenieure halten die Zusammenarbeit zwischen Berechnung und Konstruktion für zu 100% parallel)

Abbildung 3-6: Parallelität der Arbeit zwischen Konstruktion und Simulation

Simultan bedeutet nicht automatisch effizient, wie der Vergleich von Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 zeigt, bei dem nur 42% der befragten Konstrukteure die Zusammenarbeit für parallel, aber 70% für effizient halten (siehe Abbildung 3-7), so dass sich die Frage aufdrängt, wie die aktuelle Effizienz der Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Simulation aus

Sicht der Anwender gesehen wird. In Abbildung 3-7 ist die Sichtweise der Konstrukteure und Simulationsingenieure auf die Frage der Effizienz der Zusammenarbeit dargestellt und es zeigt sich, dass auf beiden Seiten rund ein Drittel der Befragten die Zusammenarbeit für nicht effizient halten.

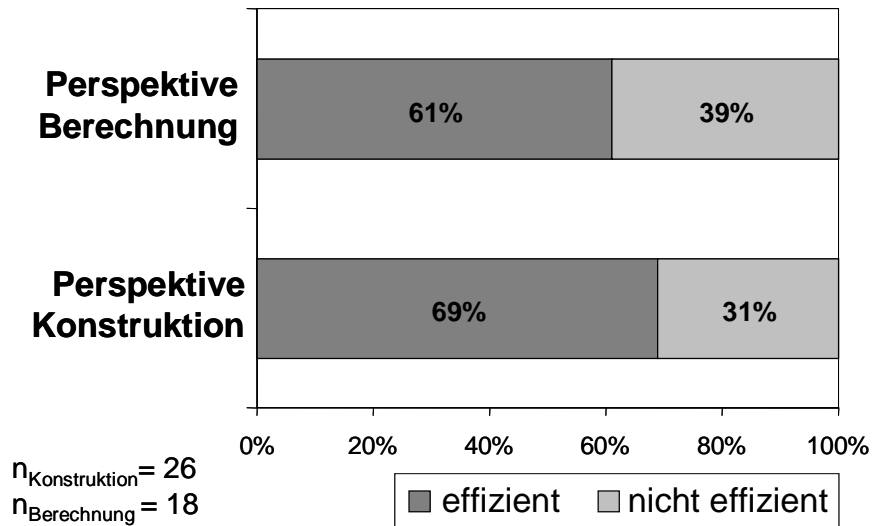


Abbildung 3-7: Geschätzte Effizienz der Zusammenarbeit von Konstruktion und Simulation

Interessant ist hier die leichte Diskrepanz zwischen Berechnung und Konstruktion, denn die Konstrukteure schätzen die Zusammenarbeit effizienter ein als die Berechnungsingenieure. Eine mögliche Begründung dafür ist, dass die Konstrukteure wie bereits erwähnt die Berechnung noch häufig als Dienstleister mit begrenztem Einfluss wahrnehmen und somit ein Teil der gestalterischen Vorschläge der Simulation nicht umgesetzt wird bzw. abgeändert wird, was die Arbeit in der Simulation dann im Nachhinein überflüssig macht.

Kern des SE-Gedankens ist die zielgerichtete, interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit unterschiedlicher Bereiche mit straffem Projektmanagement unter dem Einsatz von Methoden [EHRENSPIEL 2003]. Das bedeutet aber, dass die Kommunikation zwischen den einzelnen SE-Team-Mitgliedern sehr wichtig ist und die Basis bildet für eine erfolgreiche Umsetzung des SE-Gedankens. Nicht anders verhält es sich zwischen Konstruktion und Simulation, die innerhalb der SE-Struktur sehr unterschiedliche Rollen innehaben: während der Konstrukteur oft das SE-Team leitet, ist der Simulationsingenieur nur phasenweise oder gar nicht eingebunden. Es zeigt sich bei der Umfrage jedoch vor allem eins: effizientere Kommunikation spielt gerade zwischen Konstruktion und Simulation eine bedeutende Rolle. Folgende Stichworte sind hier vorrangig zu benennen:

- Erstellung und Abstimmung gemeinsam getragener Konzepte bereits in frühen Phasen der Entwicklung im Sinne des Frontloadings

- Frühe und verbindliche Zielvereinbarung mit dem gemeinsam zu erstellenden Produkt als Bindeglied
- Raum für informelle Gespräche und den formellen Informationsaustausch in gemeinsamen Routinesitzungen
- Gegenseitiges Verständnis und Schaffung des Bewusstseins der Arbeitsinhalte der anderen Prozessbeteiligten
- Wechselseitige Verknüpfung von Geometrie und Simulationsdaten zur Rückverfolgung von Varianten und zur besseren Überprüfung der funktionalen Ziele in der Konstruktion

Eine Möglichkeit der verbesserten Kommunikation stellt eine größere räumliche Nähe zwischen Konstruktion und Simulation dar. Trotz verbesserter Möglichkeiten auf diesem Gebiet mit den Mitteln der elektronischen Kommunikation via E-Mail, (Mobil-)Telefon, Videokonferenzen, etc. wird die räumliche Nähe nach wie vor als ein wichtiger Erfolgsfaktor der effizienten Kommunikation betrachtet, und das sowohl von der Konstruktion als auch der Simulation. Zu bedenken ist hierbei allerdings, dass der Trend in der Industrie eher in die Richtung einer verteilten Arbeitsweise mit der gezielten Nutzung von technischen und menschlichen Ressourcen geht, ohne räumliche Distanzen zu berücksichtigen, und der Bedarf nach verteilt-kooperativen Arbeitsmethoden steigen wird [HASSEL ET AL 1998].

Mit den SE-Prozessen geht automatisch ein in gewissem Rahmen standardisierter Prozess einher, ohne den ein straffes Projektmanagement nicht möglich ist. Wie bereits erwähnt sind die Konstrukteure üblicherweise stärker in den SE-Prozess integriert, so dass es nicht weiter verwunderlich ist, dass sie standardisierte Prozesse eher begrüßen als die Berechner, wie aus Abbildung 3-8 zu ersehen ist: 67% der Berechner lehnen standardisierte Prozesse ab, vor allem wegen mangelnder Flexibilität, während nahezu derselbe Prozentsatz (64%) an Konstrukteuren diese eher begrüßen würde.

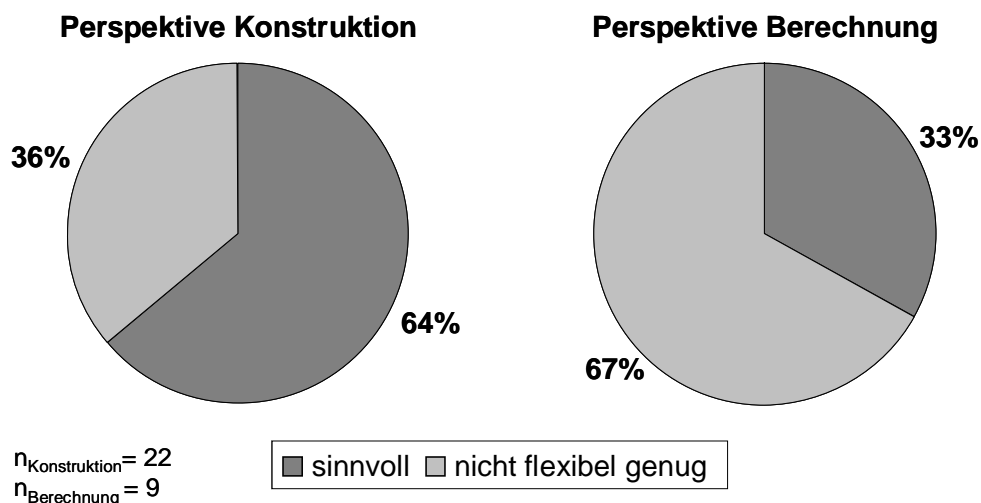


Abbildung 3-8: Standardisierte Prozesse in der Konstruktion und Berechnung

Zu erklären ist das Ergebnis z. T. mit der Tatsache, dass die Konstruktion häufig als freigebende Instanz im Entwicklungsprozess mehr Standards benötigt, um die Komplexität von Produkt und Prozess beherrschbar zu machen. In der Simulation wird Kreativität zur Lösungssuche von funktionalen Problemen verlangt, die durch zu große Standardisierung eher eingeschränkt werden könnte. Versteht man unter Standardisierung aber einen geregelten Informations- und Datenaustausch, der für beide Seiten Verbindlichkeiten gepaart mit klaren Rollen und Verantwortlichkeiten schafft, so wäre die Zustimmung zu standardisierten Prozessen auf beiden Seiten sicherlich höher. Dies kann z. B. durch die Einführung gemeinsamer virtueller Meilensteine, gepaart mit funktionalen Freigaben der Simulation, geschehen, die auf beiden Seiten Akzeptanz finden.

3.1.1.1.7 Integration von Konstruktion und Berechnung aus Sicht der Anwender

Wie von KREIMEYER ET AL [2005] gezeigt, konzentriert sich die Forschung auf dem Gebiet der CAD-CAE-Integration sehr stark auf technische und prozessuale Aspekte, siehe dazu Kapitel 2.3 und Abbildung 3-13 und Abbildung 3-14. Dies spiegelt sich in der Anwenderbefragung nur bedingt wider, die meisten Aussagen lassen eher darauf schließen, dass der soziokommunikative Aspekt des Problems mindestens dieselbe Wichtigkeit besitzt wie der technische. Es lässt sich feststellen, dass aus Sicht der Befragten die Notwendigkeit einer engeren Zusammenarbeit und Vernetzung zwischen Konstruktion und Simulation besteht. Dies umfasst folgende Handlungsbereiche:

- **Ziele:** die Ingenieure in Konstruktion und Simulation messen der verbindlichen und akzeptierten Zielvereinbarung eine hohe Bedeutung bei. Als Folge werden dabei Rollen und Verantwortlichkeiten klarer definiert und der Abgleich bei Zielkonflikten vereinfacht sich. Mit der Zunahme an zu simulierenden Anforderungen an das Produkt ist dies gerade für die Simulationsingenieure eine wichtige Voraussetzung um einen effizienteren Entwicklungsprozess darstellen zu können.
- **Management:** unter diesem Begriff subsumieren sich alle Aussagen zu den Bereichen Führung und Prozessgliederung. Aber auch hier spielen Transparenz, klare Verantwortlichkeiten und Rollen sowie eine Prozessintegration der Beteiligten mit klaren Projektzuordnungen eine wichtige Rolle, Aufgaben, die traditionell dem Management zugeordnet werden.
- **Information und Kommunikation:** hier gibt es unterschiedliche Auffassungen der Anwender, was darunter zu verstehen ist. Schwerpunktmäßig wird der effiziente Datentransfer und Kommunikation gepaart mit der Ergebnisrückführung adressiert.
- **Datenmanagement:** PDM-Systeme bilden die Grundlage für die Datenverwaltung in der Konstruktion [KLEMENT 2005], ein effizientes Datenmanagement ist somit auch Kern einer erfolgreichen Integration von Teilprozessen der virtuellen Entwicklung. KELLNER [1999] fordert hier zu Recht, dass die heutigen PDM-Systeme einerseits die Varianz und Versionsvielfalt in der Autoindustrie abbilden müssen, andererseits aber auch einer größeren Integration von Konstruktion und Simulation genügen müssen. Dies zeigen auch die Antworten der Anwender auf dem Gebiet des Datenmanagements, die hier unisono Verbesserungen fordern, sei es in Form einer gemeinsamen Datenbasis zum schnelleren Ergebnisabgleich oder einen ständigen Abgleich zwischen

Konstruktions- und Berechnungsmodellen, was aber nicht allein durch das Datenmanagement, sondern nur im Zusammenspiel der eingesetzten CAx-Werkzeuge zu lösen ist.

In Abbildung 3-9 sind die wichtigsten Handlungsfelder aus Sicht der Anwender dargestellt, getrennt nach Konstruktion und Berechnung. Während die Konstruktion dem Datenmanagement weniger, der Ergebnisrückführung mehr Bedeutung beimisst, was sich weitgehend mit den vorher getätigten Untersuchungen und Aussagen deckt, wird sowohl von Konstruktion als auch Berechnung die Kommunikation als der entscheidende Schlüssel für eine erfolgreiche Zusammenarbeit gesehen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass effiziente Kommunikation im Detail noch zu definieren ist, wie im Folgenden zu zeigen sein wird. Dabei geht es sowohl um die technische Unterstützung der Kommunikation in Form von CAx-, PDM- und anderen Software-Systemen als auch um die übermittelten Informationen. Psychologische und soziologische Aspekte der Kommunikation werden nicht in die Betrachtung miteinbezogen.

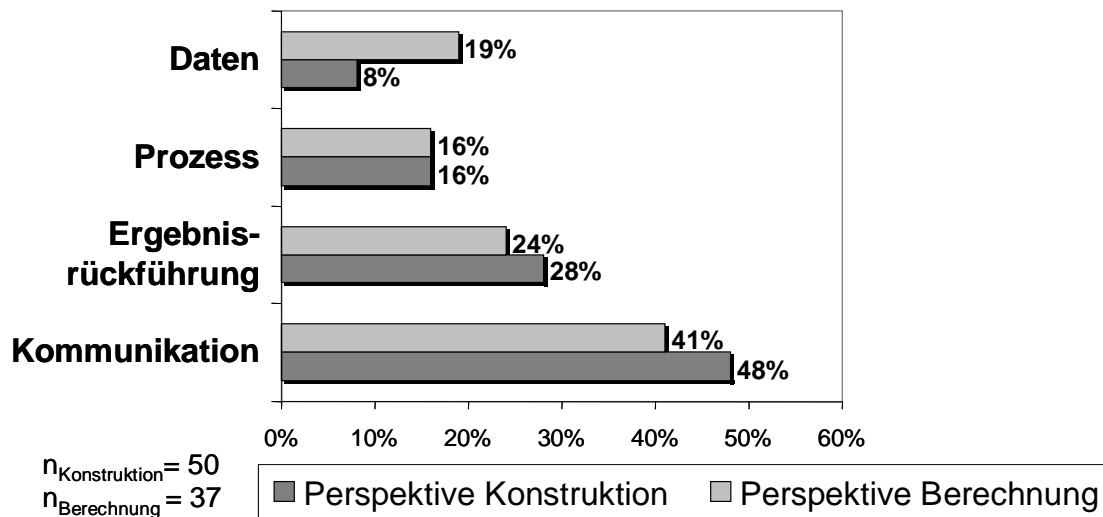


Abbildung 3-9: Erfolgsfaktoren der Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Simulation

3.1.2 Studie zur Kommunikation zwischen Konstruktion und Simulation

Zur näheren Untersuchung und Bestätigung der Ergebnisse der Umfrage wurde eine Kommunikationsstudie in Zusammenarbeit mit der Universität Cambridge zur weiteren Identifizierung von Handlungsfeldern durchgeführt [MAIER ET AL 2006]. Bedient wird sich dabei der Methode des Reifegradmodells aus dem Qualitätsmanagement, nach dem vor einer Ergebnisseine Prozessverbesserung erreicht werden muss [CROSBY 1979] und die fünf Reifegradstufen mit verschiedenen Aspekten aus der Qualitätssicherung enthält. Die 50 Einflussfaktoren der Kommunikation werden in fünf Gruppen, Organisation, Team, Individuum, Information und Produkt, unterteilt und den Schlüsselfaktoren vier Reifegrade zugeordnet (A-D). Im Rahmen von Interviews mit Ingenieuren aus der Konstruktion und Simulation werden die Zustände

hinsichtlich der Einflussfaktoren abgefragt: wie ist der Ist- und wie der Soll-Zustand, aus den Antworten wird dann der Durchschnitt gebildet [MAIER ET AL 2006]. Dabei werden die Konstrukteure und Berechner zuerst getrennt befragt und abschließend in einem Workshop wieder zusammengeführt.

Nach MAIER ET AL [2006] zeigen die Ergebnisse, dass die Lücke zwischen dem aktuellen und dem gewünschten Zustand bei den Simulationsingenieuren im Allgemeinen größer ist als bei den Konstrukteuren und es einige herausstechende Faktoren gibt, aus denen Handlungsbedarf ableitbar ist. Verbesserungsbedarf besteht u. a. darin, gemeinsame Ziele zu definieren, den Entwicklungsprozess mit seinen notwendigen Prozessschritten den beteiligten Ingenieuren transparent zu machen, und Rollen und Verantwortlichkeiten klar zu definieren, wobei hier anzumerken ist, dass das für die Konstruktion weitaus klarer ist als für die Simulation. In Abbildung 3-10 ist dargestellt, wie der Informationsbedarf des jeweiligen Gegenübers eingeschätzt wird und wie der jeweils andere glaubt, mit Informationen versorgt zu sein. Der obere Teil der Grafik zeigt dabei den Austausch in Richtung Berechnung, der untere den in Richtung Konstruktion. Dabei symbolisiert der erste Balken („Ist“) jeweils den tatsächlichen Übertrag an Informationen, der zweite Balken („Soll“) stellt dar, welche Informationen der Partner in Konstruktion bzw. Berechnung jeweils glaubt zu benötigen. In Richtung der Berechnung ist das Gefälle besonders groß: die Simulation glaubt, nur die Hälfte der Informationen zu erhalten, die sie eigentlich erhalten sollte, umgekehrt wird aber auch nur ca. ein Drittel der Informationen, die die Konstruktion erhalten sollte, von der Berechnung an die Konstruktion übergeben. Es zeigt sich generell bei der Umfrage, dass die Simulation mit dem wechselseitigen Informationsaustausch tendenziell unzufriedener ist als die Konstruktion, möglicherweise ein Indiz für die Rolle im Entwicklungsprozess, in dem die Simulation nach wie vor häufig als Dienstleister ohne echte Verantwortung agiert. Eine weitere Fragestellung sind in diesem Zusammenhang die gefühlten Informationsbedarfe, die sich von den tatsächlichen unterscheiden, siehe dazu Kapitel 4, in dem die übertragenen Informationen analysiert werden.

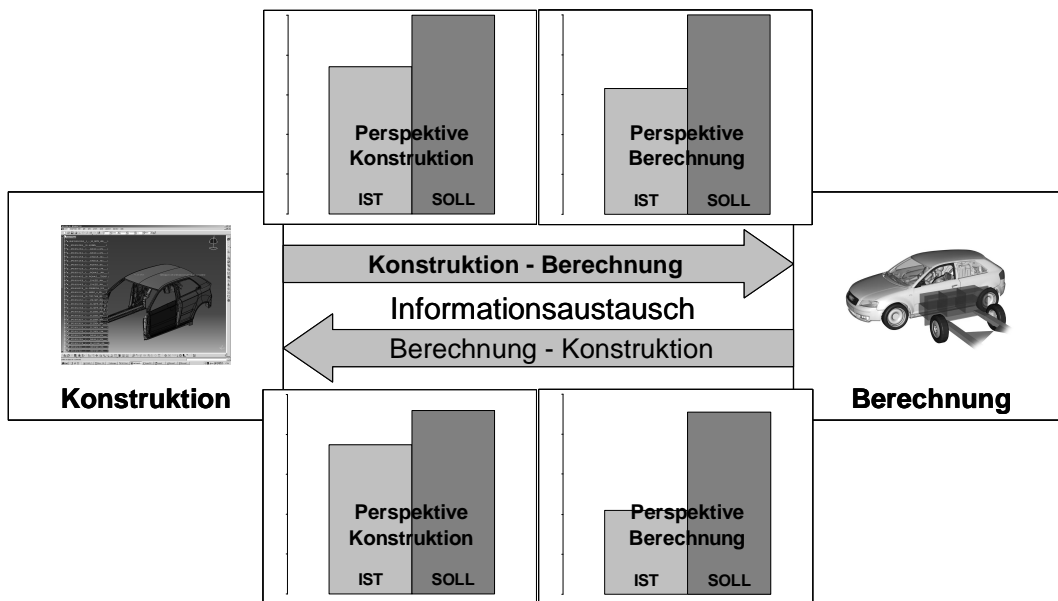


Abbildung 3-10: Wissen um Informationsbedarfe im CAD-CAE-Prozess [MAIER ET AL 2006]

Aufgrund der begrenzten Teilnehmerzahl der Studie (acht Personen, vier aus der Konstruktion und vier aus der Simulation) ist eine Pauschalisierung der Ergebnisse aus statistischen Gründen nicht zulässig, es lassen sich jedoch Trends ableiten, speziell zu den Faktoren mit den größten Differenzen zwischen Ist- und Soll-Zustand. Ein großes Handlungsfeld ist die Einordnung der eigenen Rolle und Verantwortung in den Gesamtzusammenhang der Produktentwicklung, hier fehlt es, gerade in einem großen Unternehmen, in dem die Studie durchgeführt wurde, an Transparenz und Klarheit. Dies wird durch den Umstand verschärft, dass sich die Ingenieure in der komplexen Arbeitswelt von Multi-Projektlandschaften bewegen, in denen die Projekte untereinander aufgrund von maximalen Synergieeffekten eine hohe Vernetzung untereinander haben [DANILOVIC & BÖRJESSON 2001]. Ein zweiter Schwerpunkt liegt in der Reflektion bzw. dem Lernen aus den Fehlern und Mängeln vorangegangener Produkte und Projekte. Besonders wird dies von der Konstruktion angemerkt, hier ist die Lücke zwischen Ist und Soll sehr hoch. Als hauptsächliches Problem stellt sich aber auch hier wie in der Umfrage der Informationstransfer und damit im weitesten Sinne die Kommunikation dar. Hier liegt sowohl in der Konstruktion als auch in der Simulation ein wesentlicher Unterschied zwischen Ist- und Soll-Zustand vor, der sich manifestiert in einer großen Unsicherheit der Prozessbeteiligten, ob sie die richtigen Informationen haben, ob sie wissen, welche Informationen die Partner im Prozess benötigen und ob sie noch auf dem aktuellen Entwicklungsstand arbeiten. Da alle Problemlösungsprozesse auch als informationsverarbeitende Prozesse verstanden werden können und richtige Entscheidungen damit auch nur gefällt werden können, wenn die Informationen vorhanden sind [IRLINGER 1998], löst dies bei den Konstrukteuren und Berechnern als hochgradige Problemlöser funktionaler Zielkonflikte ein hohes Maß an Unsicherheit aus. Der Informationstransfer ist somit eingebettet in eine effiziente Kommunikationsumgebung ein Schlüssel für eine effiziente CAD-CAE-Integration.

3.2 Problemdimensionen der Integration von Konstruktion und Simulation

Nach der Darstellung des Standes der Forschung und Technik zur Integration von Konstruktion und Simulation und den Ergebnissen aus den Anwenderstudien wird klar, dass ein tiefergehendes Verständnis der Komplexität des Problems vonnöten ist, um Lösungen zu entwickeln. In Abbildung 3-11 ist ein typischer Prozessablauf zwischen Konstruktion und Berechnung nach DEUBZER ET AL [2005A] dargestellt mit der Problematik, die eigentlich parallel ablaufenden und stark miteinander vernetzten Prozesse innewohnt: die Tätigkeiten sind zwar getrennt, es besteht aber ein hohes Maß an Abhängigkeit untereinander, vor allem was den Input von der jeweils anderen Seite als Startvoraussetzung für die eigene Arbeit betrifft. So ist die Simulation angewiesen auf Informationen zu den Anforderungen, Randbedingungen, Termine, etc. während die Konstruktion im Gegenzug von der Simulation die Ergebnisse in der entsprechenden Form benötigt. Dieser Prozess gewinnt enorm an Komplexität, wenn sich die Zahl der Beteiligten, die Anforderungen und die Zahl der Komponenten erhöht, so dass es notwendig ist, die Problematik der CAD-CAE-Integration transparent zu machen. Dies geschieht im Folgenden durch Einführung der Dimensionen der Integration und der anschließenden Entwicklung eines Problemsystems zur Integration, das den verschiedenen Aspekten

Rechnung trägt. Daraus lassen sich dann Einzelprobleme herausgreifen und in dem Bewusstsein des Zusammenhangs mit anderen Aspekten lösen.

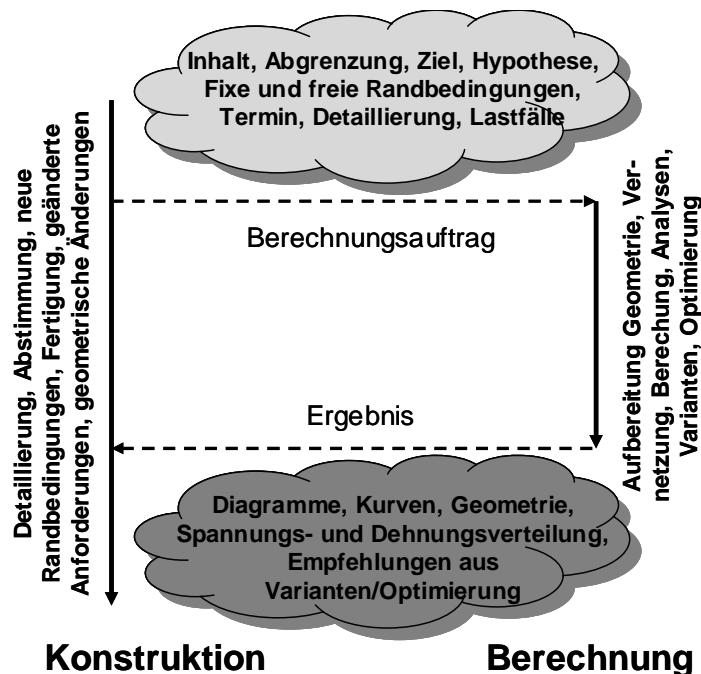


Abbildung 3-11: Zusammenspiel Konstruktion und Simulation in einem typischen CAD-CAE-Prozess [DEUBZER ET AL 2005A]

3.2.1 Einführung der Dimensionen der Integration

Sowohl aus den Anwenderbefragungen und der Kommunikationsstudie als auch aus zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen geht hervor, dass es sich bei der Integration von Konstruktion und Simulation in Form einer effizienteren Zusammenarbeit nicht nur um ein rein technisches Problem handelt, sondern dass die Einflüsse sehr vielfältig sind und Faktoren wie die Kommunikation oder gemeinsame Ziele eine große Rolle spielen [KREIMEYER ET AL 2005]. DEUBZER ET AL [2005A] schlagen hier einen ganzheitlichen Ansatz zur Lösung des Problems vor und führen als Betrachtungsgegenstand die Dimensionen Produkt, Mensch, Daten und Werkzeuge ein. Die zeitliche Komponente bildet der Entwicklungsprozess, weshalb der Prozess als weitere Dimension hinzugefügt wird. Die daraus resultierenden fünf Dimensionen der CAD-CAE-Integration sind in Abbildung 3-12 dargestellt:

- Der Mensch steht als handelndes und entscheidendes Individuum im Mittelpunkt, über ihn läuft die Kommunikation in Form von Daten und Informationstransfer.

- Mit den Werkzeugen werden die benötigten Daten generiert, dabei kann es sich um CAx-Werkzeuge oder auch allgemeine IT-Werkzeuge handeln, die zur Generierung von Daten verwendet werden.
- Die Daten bilden die Basis für Folgeprozesse. Sie werden weiterverarbeitet, interpretiert und geändert. Wie in Kapitel 2 gezeigt werden konnte, spielt die Anreicherung von Daten eine wichtige Rolle für Integrationsprozesse, so dass der Umgang mit Daten eine wichtige Basis für Integrationsprozesse bildet. Werkzeuge und Daten bilden gemeinsam die Grundlage der virtuellen Produktentwicklung.
- Der Prozess bildet ein Verknüpfungselement, in dem Werkzeuge, Daten und Menschen sinnvoll eingesetzt werden müssen, um ein Produkt zu entwickeln. Der Mensch ist dabei gleichzeitig passiv und aktiv: er generiert und steuert den Prozess, ist aber gleichzeitig Objekt in Form von Ressourcen, Tätigkeiten, etc.
- Produkt ist Rahmen und Randbedingung zugleich. Das Produkt hat über die Produktstruktur, die Anforderungen und die daraus resultierenden Konstruktions- und Berechnungsmethoden einen großen Einfluss auf die CAD-CAE-Integration, so dass es keineswegs zulässig ist, das Produkt in der theoretischen Betrachtung zu vernachlässigen und später als Beispiel heranzuziehen. Die Komplexität des Produkts hat direkten Einfluss auf die anderen Dimensionen [DEUBZER ET AL 2005A].

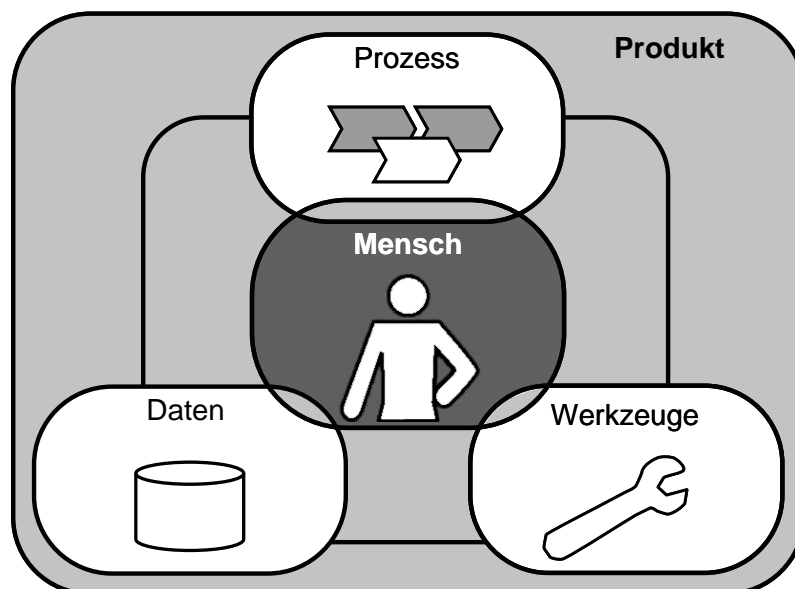


Abbildung 3-12: Problemdimensionen der Integration von Konstruktion und Simulation

3.2.2 Einordnung des Standes der Forschung in die Dimensionen der Integration

Im Rahmen einer Untersuchung zu den wichtigsten Veröffentlichungen auf dem Gebiet der CAD-CAE-Integration zeigt sich, dass die Schwerpunkte der bislang veröffentlichten Forschungsarbeiten auf den IT-Werkzeugen und dem Datenmanagement liegen, z. T. noch im Bereich Entwicklungsprozesse, dass sich aber wenig mit dem Produkt an sich oder dem Menschen als handelndes und steuerndes Individuum beschäftigen [KREIMEYER ET AL 2005]. Ausgewertet wurden dabei nationale und internationale Veröffentlichungen auf dem Gebiet. Abbildung 3-13 zeigt die Intensität der Forschungs- bzw. Veröffentlichungstätigkeit innerhalb der unterschiedlichen Dimensionen der CAD-CAE-Integration. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Problematik vornehmlich als technische Fragestellung verstanden wird, d. h. als Betrachtung von IT-Systemen bzw. -Werkzeugen und den zugehörigen Daten. Eine Prozessverknüpfung findet noch teilweise statt, während die Einbindung des Menschen hinsichtlich Werten, Rollen und Zielen kaum stattfindet [KREIMEYER ET AL 2005].

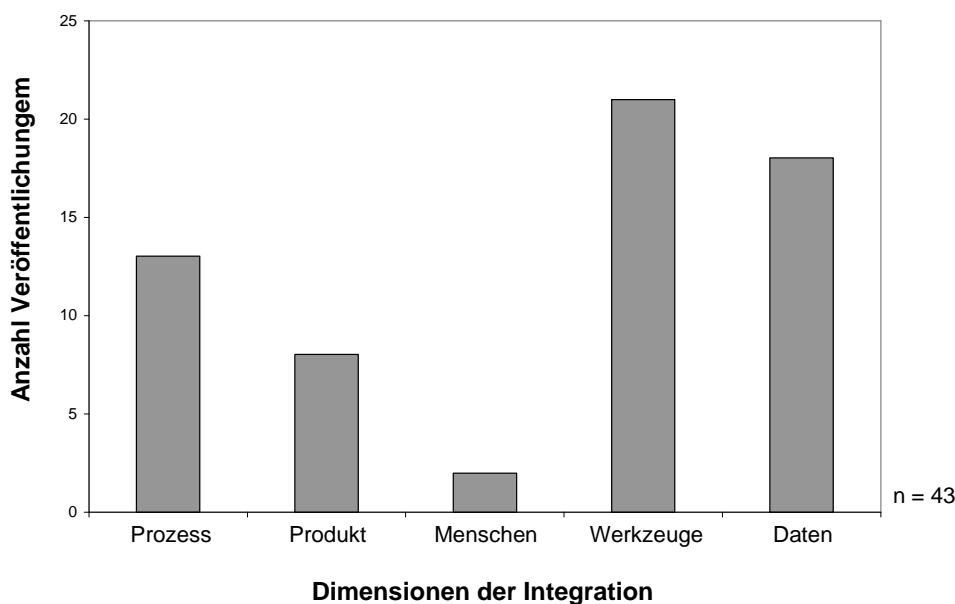


Abbildung 3-13: Unterschiedliche wissenschaftliche Ansätze zur CAD-CAE-Integration innerhalb der unterschiedlichen Problemdimensionen [KREIMEYER ET AL 2005]

Von Interesse ist, inwieweit unterschiedliche Ansätze kombiniert werden und die unterschiedlichen Dimensionen miteinander verknüpft sind. Daraus lässt sich ableiten, wie breit der Anspruch der Lösungsfindungen auf dem Gebiet der CAD-CAE-Integration ist. In einer tieferen Betrachtung wurde die Kombination von Ansätzen über zwei und mehr Dimensionen betrachtet, wie Abbildung 3-14 zeigt. Einige Autoren erwähnen dabei den übergreifenden Charakter innerhalb zweier Dimensionen, in drei oder mehr Dimensionen gleichzeitig wird die CAD-

CAE-Integration nicht adressiert. Natürlich ist dabei auch zu berücksichtigen, dass allgemeine Artikel zur übergreifenden Gestaltung von Integrationsprojekten in dieser Auswertung nicht berücksichtigt wurden. Es wurde lediglich Literatur in Betrachtung gezogen, die explizit auf die Zusammenarbeit von Konstruktion und Simulation eingeht. Der in Kapitel 2 vorgestellte umfangreiche Stand der Forschung und Technik beweist aber zusätzlich, dass die Konzentration der Forschungsarbeiten eher in den Dimensionen Werkzeuge, Daten und Prozess zu finden sind und das Produkt oft nur als Anwendungsbeispiel, aber nicht als Ausgangspunkt der Betrachtungen verwendet wird und der Mensch mit seinen individuellen Fähigkeiten stark vernachlässigt wird.

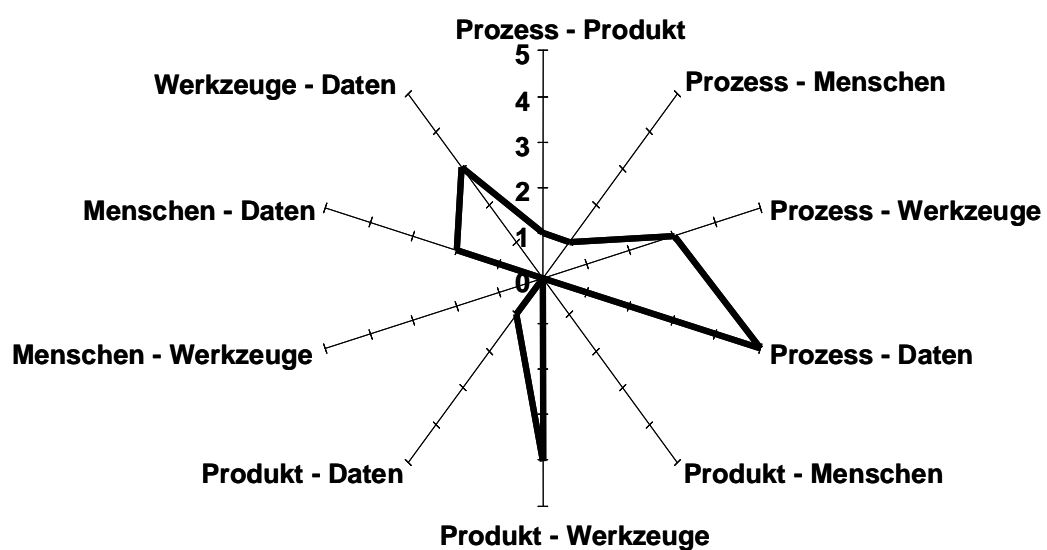


Abbildung 3-14: Gleichzeitige Adressierung der CAD-CAE-Integration in zwei Dimensionen
[KREIMEYER ET AL 2005]

3.2.3 Entwicklung eines Problemsystems

Aus den aus Forschung und Technik vorliegenden Ansätzen und aus den Studien der Anwenderbefragung und zur Kommunikation werden die fünf Dimensionen der CAD-CAE-Integration in ihrer inhärenten Problematik untersucht und dargestellt. Anspruch des ganzheitlichen Ansatzes ist aber auch, die Teilprobleme zu verknüpfen, die daraus entstehende Systematik wird als Problemsystem bezeichnet. Ziel ist es dabei, die Komplexität zu beherrschen und sich bewusst zu machen, dass die Dimensionen untereinander hochgradig verknüpft sind.

Problemanalyse und Systematik der Integration

3.2.3.1.1 Produkt

Ausgehend von der These, dass das Produkt den Prozess, das Datenmanagement und die eingesetzten Werkzeuge bestimmt, nimmt das Produkt für die Integration von Gestaltung und Berechnung eine zentrale Funktion ein [DEUBZER ET AL 2005A]. Eine Vielzahl von Lösungen und Ansätzen aus Forschung und Technik konzentriert sich auf einfache Produkte mit einer überschaubaren Zahl an mechanischen Anforderungen. Das Produkt steht dabei nicht im Mittelpunkt, sondern ist lediglich Beispiel zum Einsatz einer entwickelten Methode. Damit gehen oft die Skalierbarkeit und Übertragbarkeit von Vorgehensweisen verloren, da sie lediglich für wenige Spezialfälle gelten. Problematisch ist es, das Produkt vollständig zu vernachlässigen und zu abstrahieren. Eine umfassende Integration aller Konstruktions- und Berechnungsverfahren ist nach heutigem Stand der Technik nicht möglich und wenig sinnvoll, so dass ein solcher Ansatz wenig dienlich bzw. substantiell wäre. Da jedes Produkt spezifische Verfahren und Methoden erfordert, ist es elementarer Teil einer Vernetzung von Gestaltung und Berechnung.

Beide Ansätze scheitern daran, dass die Zusammenhänge und gegenseitigen Abhängigkeiten von Anforderungen, Produktstruktur, Prozessen, Daten- und Informationsmanagement und eingesetzten Werkzeugen elementar sind für eine erfolgreiche Integration von Gestaltung und Berechnung. Das bedeutet natürlich auch, dass alle entwickelten Verfahren ihre Grenzen haben und nicht ohne weiteres auf strukturell völlig unterschiedliche Produkte übertragen werden können. Für einen umfassenden Ansatz können Einzellösungen, die nur für bestimmte Bereiche anwendbar sind, in einen sinnvollen Kontext integriert werden. Das Produkt mit seinen spezifischen Anforderungen, Prozessen und Methoden bildet den Rahmen für eine erfolgreiche Vernetzung von Prozessen in der Entwicklung. Das Produkt ist somit der gemeinsame Bezug der beteiligten Menschen, Daten, Werkzeuge und Prozesse. Die Komplexität des Produktes bestimmt dabei die Schwierigkeit der Integrationsarbeit. Die Komplexität bezieht sich dabei nicht nur auf die Anzahl der Bauteile oder die Komplexität der Prozesse, wie z. B. Arbeitsteiligkeit, sondern auch auf die Anforderungen. Anforderungen lassen sich unterteilen und teilweise hierarchisieren, beeinflussen sich gegenseitig, werfen Zielkonflikte auf und werden oft sequentiell betrachtet [LINDEMANN 2007]. Konstruktion und Berechnung müssen mit dieser Komplexität umgehen können, so dass das Produkt über die Anforderungen und die Produktstruktur einen beherrschenden Einfluss auf die Integration von Gestaltung und Berechnung hat.

3.2.3.1.2 Mensch

Die Leistungsfähigkeit der modernen CAX-Systeme hat dazu geführt, dass wichtige Aspekte der Integration von Systemen und Prozessen in der Produktentwicklung ohne den Menschen als ausführendes und handelndes Individuum betrachtet wurden. AMFT [2003] stellt hier zu Recht fest, dass ein System die primäre Intelligenz nach dem aktuellen Stand der Technik nicht zu ersetzen vermag, WÖLFLE [1998] weist dem Menschen die Entscheidungen und dem Rechner als Werkzeug ausführende Arbeiten im Konstruktions-Berechnungsprozess zu. Die

o.g. Untersuchungen in Form von Umfragen und Kommunikationsanalysen haben ergeben, dass sich die beteiligten Ingenieure des Kommunikationsdefizits sehr wohl bewusst sind und das Problem auch bei der Integration von Konstruktion und Simulation als sehr wichtig erachten. Eine Rolle spielt dabei auch die Organisationsstruktur in den Unternehmen: handelt es sich um eine zentrale Organisation der Simulation oder eine dezentrale und ist das Unternehmen eher funktions- oder eher komponentenorientiert organisiert.

Der Paradigmenwechsel in vielen Unternehmen, von einer bauteil- zu einer mehr funktionsorientierten Arbeitsweise und den steigenden Möglichkeiten in der Berechnung hat die Rolle der Konstruktion und Simulation ebenfalls verändert. Die Simulation ist vom Dienstleister der Konstruktion zum essentiellen Bestandteil der Produktentwicklung geworden, die Konstruktion hat immer mehr die Rolle des Moderators der Produktentwicklung inne, die zwischen vielen beteiligten Substrukturen vermitteln und letztendlich den Kompromiss aus vielen verschiedenen Anforderungen finden muss. Dazu kommt, dass Menschen im Entwicklungsprozess durch externe Darstellungen wie Sprache, Zeichnungen, CAD-Modelle oder Gesten handeln, die aus dem Kontext des jeweiligen Arbeitsgebietes stammen [BIRKHOFFER & JÄNSCH 2003]. Daraus folgt, dass jeder handelnde Mensch in der Produktentwicklung sein eigenes mentales Modell hat, das von seinem Arbeitsgebiet geprägt wird. Dies manifestiert sich auch in den Denkstrukturen der Entwicklungsingenieure in der Konstruktion und in der Simulation: in der Konstruktion steht die Komponente als Kompromiss vieler Anforderungen im Mittelpunkt, in der Simulation wird die Funktion stärker betont. In den Entwicklungsabläufen der meisten Unternehmen wird vor einer Erprobung mit realen Prototypen eine intensive Auslegung der gewünschten Eigenschaften mit rein digitalen bzw. virtuellen Prototypen durchgeführt, so dass der Simulation hier eine sehr große Verantwortung hinsichtlich der Erreichung der funktionalen Ziele zukommt [BREITLING ET AL 2006]. Um diese Verantwortung wahrnehmen zu können, ist gegenseitige Akzeptanz und Transparenz in den Teilprozessen notwendig.

Im Zuge der Globalisierung, aber auch auf lokaler Ebene nimmt die verteilte Entwicklung immer mehr an Bedeutung zu. Dies manifestiert sich in der unternehmensinternen, örtlichen und zeitlichen Trennung von Entwicklungsabläufen als auch in der unternehmensexternen Trennung durch Auslagerung von Entwicklungsleistungen [LINDEMANN & ZÄH 2004]. Der Bereich CAD- und CAE-Tätigkeit ist davon besonders stark betroffen, weil sich hier viele Arbeitsprozesse klar abtrennen und damit autark erledigen lassen. So werden Vernetzungen und Modellaufbauten in der Berechnung nicht mehr bei den OEM durchgeführt, sondern bei Ingenieurdienstleistern bzw. Lieferanten. Konstruktionsaufgaben wie Detailkonstruktionen von Komponenten bzw. Subsystemen werden kostengünstiger und oftmals mit besserer Qualität bei Dienstleistern abgearbeitet. Das wirft automatisch die Frage auf, welches Qualifikationsprofil in der Konstruktion- und Simulation in den jeweiligen Unternehmen erwartet wird und wie die Kommunikation, auch im Sinne nachhaltigen Datenmanagements, über die Unternehmen hinweg funktioniert. CRABB [1998] betont in diesem Zusammenhang sehr stark die wichtige Rolle des Menschen bei Erneuerungsprozessen und maßt der kontinuierlichen Weiterbildung und der Einbeziehung von den Menschen in die Veränderungsprozesse von Unternehmen eine sehr hohe Bedeutung für den Unternehmenserfolg zu.

3.2.3.1.3 Werkzeuge

Die auf dem Markt sich befindlichen CAx-Systeme sind hoch entwickelt hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und Spezialisierung. Auf der Konstruktionsseite existieren CAD-Systeme, deren Funktionalitäten weit über die reine Bauteilkonstruktion hinausgehen. Kinematiksimulationen, einfache lineare FEM-Solver, DMU, Knowledgeware sind nur einige Beispiele für die Erweiterung der Konstruktionswerkzeuge in den letzten Jahren. Die Systemlandschaft auf Seite der Simulation ist noch wesentlich heterogener, was an den vielen Spezialanwendungen in der Berechnung liegt: lineare und nicht-lineare Probleme, CFD-Simulationen, die Trennung in Vernetzung, Modellaufbau, Berechnung und Auswertung systemseitig durch Preprozessor-Solver-Postprozessor und nicht zuletzt die gewachsenen Strukturen in den Simulationsabteilungen der Unternehmen. Auf dem Gebiet der Werkzeuge sind speziell im Bereich der Berechnungsmethoden und der CAD-Modellierung mit Feature und Parametrik noch weitere Fortschritte zu erwarten. Angesichts des sehr hohen Niveaus der Systeme ist aber evident, dass eine Vernetzung von Gestaltung und Berechnung nicht allein eine Frage der Leistungsfähigkeit von CAx-Systemen ist.

3.2.3.1.4 Daten

Eine herausragende Rolle im Produktentstehungsprozess spielen das Datenmanagement und die Schnittstellen zwischen den eingesetzten Systemen. Eine konsistente Datenhaltung ist Voraussetzung für den effizienten Einsatz von CAx-Systemen und bildet die Grundlage für Folgeprozesse. Für komplexe Produkte, die bedingt durch Design- und Funktionsanforderungen raschen Änderungszyklen unterworfen sind, ist die große Herausforderung für das Datenmanagement, die Daten aktuell zu halten, so dass die Ergebnisse der Berechnung zeitnah den Prozessbeteiligten zur Verfügung gestellt werden können und somit auch in das Produkt einfließen können. Von besonderem Interesse für das Informations- und Datenmanagement sind der verlustfreie Transfer und die Verfügbarkeit von für das Produkt relevanten Informationen und Daten für die Prozessbeteiligten zu jeder Zeit und an jedem Ort. Für die Bereiche Konstruktion und Simulation ist größtmögliche Transparenz von hoher Bedeutung. Die Beteiligten müssen die Herkunft und den Entwicklungsstand kennen, um die Daten richtig zuzuordnen, interpretieren und einsetzen zu können. Aktuelle Untersuchungen in Unternehmen haben ergeben, dass das Datenmanagement von Konstruktion und Simulation nach wie vor getrennt stattfindet und auch wichtige Informationen, auf die beide Zugriff benötigen, wie z. B. die Ergebnisse der Berechnung, nur sehr zögerlich allen Beteiligten zur Verfügung gestellt werden. Dies liegt sicher auch daran, dass Datenmanagement mehr als Datenverwaltung denn als -management verbunden mit einer umfassenden Informationsweitergabe verstanden wird [PLÜMER 2000]. Eine gemeinsame Datenhaltung oder eine Vernetzung der Daten findet kaum statt. Schlussfolgerung daraus ist, dass an dieser Stelle großer Handlungsbedarf besteht, der eine Reform des Informations- und Datenmanagements sowie des Datentransfers bedeutet. Zu beachten ist dabei, dass das Datenmanagement zugeschnitten sein muss auf den Prozess, abgestimmt sein muss mit den eingesetzten Systemen und die Komplexität und Struktur des Produkts berücksichtigen muss, so dass eine singuläre Optimierung dieses Faktors eine umfassende Integration von Gestaltung und Berechnung nicht gewährleisten kann.

3.2.3.1.5 Prozess

Die Berechnung als Treiber für die Auslegung von Konzepten über alle Phasen des Produktentwicklungsprozesses [GROßMANN 1998, SCHELKLE & ELSENHANS 2000] ist stärker in den Entwicklungsprozess integriert und übernimmt damit auch eine höhere Verantwortung für ihre Ergebnisse und folglich für das Produkt. Dabei gilt aber stets zu beachten, dass die Funktionsverantwortung von der Simulation nicht allein, sondern oftmals zusammen mit dem Versuch, der für die Berechnung die Grundlagen zur Validierung ihrer Modelle liefert, ausgeübt wird. Hat die Simulation in der Konzeptphase die Treiberrolle, so ändert sich dies mit zunehmender Entwicklungsreife: in der Serienentwicklung ist die Berechnung nach wie vor in der klassischen Rolle der kontrollierenden und optimierenden Instanz, die fertige Konstruktionen auf verschiedene Lastfälle hin berechnet, vgl. Abbildung 2-6. Der Kostendruck und die Marktanforderungen zwingen die Unternehmen zur permanenten Straffung ihrer Prozesse. Umso wichtiger wird damit eine Prozesstransparenz, d. h. klare Definitionen bzgl. Leistungserbringung, Zeitrahmen und Verantwortung. Eine mögliche Lösung ist die Standardisierung und Harmonisierung von Prozessen und den verwendeten Dokumenten und Methoden, was aber, wie die Dimensionen Daten und Werkzeuge zeigen, derzeit nicht gelebt wird. Der Prozess spielt in der Integration von Konstruktion und Simulation eine Schlüsselrolle, da ihm, analog zum Produkt, eine Klammerfunktion über die Dimensionen Mensch, Daten und Werkzeuge zukommt, da diese alle über den Entwicklungsprozess integriert werden. Der Prozess ist somit die zielorientierte Anordnung der Elemente der anderen Dimensionen [DEUBZER ET AL 2005A].

3.2.3.1.6 Problemsystem durch Verknüpfung der Dimensionen

Die Teilprobleme der fünf Dimensionen lassen sich zu einem Problemsystem verknüpfen, das in Abbildung 3-15 dargestellt ist. Das Problemsystem, das in seiner Systematik an ein House of Quality angelehnt ist [EHRENSPIEL 2003], erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und ist mit der Abarbeitung der Teilaspekte und der Weiterentwicklung einer ständigen Veränderung unterworfen. Zur Bearbeitung der Problematik der Integration von Konstruktion und Simulation ist besonders die Verknüpfung der Dimensionen wichtig, um dem ganzheitlichen Ansatz Rechnung tragen zu können. Die Teilaspekte der Verknüpfung werden im folgenden Abschnitt kurz erläutert.

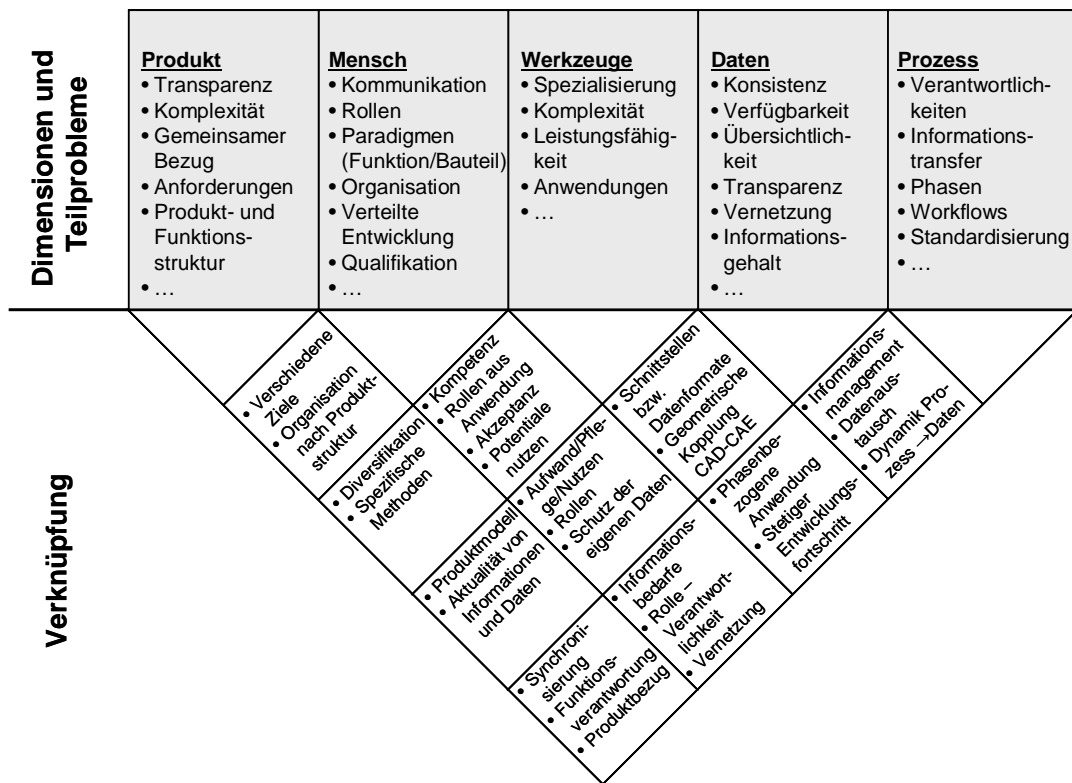


Abbildung 3-15: Problemsystem zur Integration von Konstruktion und Simulation [HERFELD ET AL 2006]

Die Dimensionen Produkt – Mensch sind in erster Linie über die unternehmensinterne Organisationsstruktur verknüpft, die vom Produkt abhängt. Mit der Organisationsstruktur hängen die Ziele zusammen: verfolgen Konstruktion und Simulation gemeinsame Ziele, findet eine Zielvereinbarung, -verfolgung und -kontrolle statt oder ist die Produktoptimierung mehr ein Gegen- als ein Miteinander? Dabei stellt sich die Frage, wie erreicht werden kann, dass die Konstruktion und Simulation gleichberechtigt zusammenarbeiten können, was automatisch bedeuten würde, dass einer funktionsorientierten Entwicklung mehr Gewicht zukommen würde. Das Produkt und die Werkzeuge bedingen einander: welche CAx-Werkzeuge werden benötigt, um welche Aufgaben abzarbeiten? Bei hochkomplexen Produkten wie Flugzeugen und Fahrzeugen müssen hochspezialisierte Werkzeuge eingesetzt werden, im Bereich der CAD-Systeme Flächen- und Volumenkonstruktion, im Bereich der Simulation werden Preprozessoren zur Vernetzung und Modellaufbau benötigt, Solver für lineare und nicht-lineare Lastfälle und Auswertemöglichkeiten in Form von Postprozessoren. Daraus folgt, dass mit der Komplexität des Produkts auch die Komplexität und Heterogenität der CAx-Systeme steigt. Spezifische CA-Methoden werden entwickelt, die oft nur für ein bestimmtes Produkt eingesetzt werden. Eng damit verknüpft ist der Zusammenhang von Produkt und Daten. Wenn man voraussetzt, dass die virtuelle Produktstruktur in Form von CAx-Daten die Repräsentation des realen Produktes in virtueller Form ist, dann wird klar, welche Bedeutung der Dimen-

sion Daten in der Integration zukommt. Die virtuelle Repräsentation des Produktes muss den Anspruch haben, stets aktuell zu sein und möglichst viele Informationen und damit Sichten auf das Produkt zu ermöglichen. Eine rein geometrische Sicht ist für die Ansprüche der modernen und effizienten Produktentwicklung eindeutig zu wenig, für eine multivariable Produktoptimierung ist eine breite Sicht auf die Produkteigenschaften notwendig.

Der Prozess muss für eine Synchronisierung der Beteiligten an der Produktentwicklung und folglich auch des Produktes in sich sorgen. Die besondere Herausforderung für den Prozess liegt dabei in Berücksichtigung der Entwicklungsphasen und in der Schaffung von Transparenz. Die Transparenz des Produktes hängt maßgeblich von der Transparenz der Prozesse ab, die Granularität der Prozesse wird durch die Produktstruktur mitbestimmt. Die Schwierigkeit für die virtuelle Entwicklung besteht nach wie vor darin, dass sich die Prozesse für Subsysteme und Komponenten nicht an Funktionen bzw. Eigenschaften orientieren, sondern wie in Kapitel 2.3.1 gezeigt an Werkzeuglaufzeiten, Erprobungsplänen und Serieneinsatzterminen. Die Hierarchisierung der Produktstruktur und die Anforderungen an das Produkt finden sich in den Prozessen wieder, so dass ein Prozessmodell zur Integration von Konstruktion und Simulation diesem Umstand unbedingt Rechnung tragen muss und die zusätzliche Integration eine funktionale Sicht schafft. Wie bereits beschrieben, sind die CAX-Werkzeuge hochspezialisiert und -komplex. Der Mensch als Anwender muss genügend Kompetenz mitbringen, um das Potential der Systeme ausschöpfen zu können und die Systeme zu beherrschen. Gerade auf Seiten der Berechnung sind die Beurteilung und die Interpretation der Ergebnisse besonders wichtig, fehlerhafte Berechnungen können teure Änderungen nach sich ziehen. Aus der Anwendung der Systeme ergeben sich bestimmte Rollen, z. B. in der Konstruktion den Konzeptkonstrukteur mit breitem Wissen oder den Detailkonstrukteur mit tiefen Kenntnissen von spezifischen Systemen, Komponenten, Produktionswerkzeugen, etc. Zur Nutzung der Potentiale der aktuell auf dem Markt befindlichen CAX-Systeme muss die Akzeptanz beim Anwender vorhanden sein, um die Werkzeuge effizient im Prozess einsetzen zu können. Dabei gilt stets, dass die Probleme in der Entwicklung im Kopf des Entwicklers, nicht vom Computer gelöst werden, der Computer unterstützt den Menschen lediglich bei der Problemlösung [CONRAD 2005].

Die getrennte Datenhaltung von Konstruktion und Simulation ist zum Teil auch im Sinne der Anwender, die eigenen Daten sollen dem Zugriff entzogen werden und die Prozessbeteiligten wollen selbst bestimmen, was sie veröffentlichen und was nicht. Der Aufwand, die eigenen Daten aktuell zu halten und damit einen Beitrag zur Datenkonsistenz zu leisten ist nicht bei allen Entwicklern gleich ausgeprägt. Dabei stellt auch PLÜMER [2000] fest, dass der schnelle Zugriff auf innerbetriebliche Informationen bei den Entwicklern höchste Priorität genießt. Zu erklären ist diese Tatsache teilweise damit, dass Inkonsistenzen gerade vermieden werden sollen, d. h. die Daten eine möglichst hohe Produktreife erlangen sollen, bevor sie veröffentlicht werden, aber auch mangelnde Transparenz im Prozess („Wer braucht was zu welchem Zeitpunkt?“), zumal gerade in der Simulation auch mit Modellen von geringerem konstruktiven Reifegrad gearbeitet werden kann. Eine weitere Rolle spielen aber auch menschliche Faktoren, wie das Streben nach einem perfekten Datenstand und damit einhergehend die Angst, frühzeitig unreife und inkonsistente Modelle zu publizieren. Damit hängt auch die Verknüpfung der Dimensionen Mensch und Prozess zusammen. Informationsbedarfe müssen klar sein und die Rollen und Verantwortlichkeiten im Prozess für jeden transparent definiert sein. Der

Mensch ist der Treiber und Gestalter des Prozesses und füllt ihn mit Leben. Der Prozess als abstraktes Gebilde muss definiert, exekutiert und kontrolliert werden. Daran scheitern viele Unternehmen, bei denen die Prozesse zwar definiert werden, aufgrund mangelnder Exekutive und Kontrolle aber ein unkontrolliertes Eigenleben führen. Damit hängt die Standardisierung und Harmonisierung von Prozessen zusammen, die sich beispielsweise in Form von virtuellen Meilensteinen mit definierter Produktreife realisieren lässt.

Ein direkter Zusammenhang besteht zwischen den Dimensionen Werkzeuge und Daten, da die in diversen CAx-Systemen erzeugten Daten in verschiedenen Formaten gespeichert und verwaltet werden müssen. Die Heterogenität auf Seiten der CAx-Systeme bildet sich im Datenmanagement ab, dadurch ergeben sich automatisch Schnittstellen- und Konvertierungsprobleme. Der Einsatz der Werkzeuge über den Prozess ist abhängig vom Entwicklungsfortschritt und den zu bearbeitenden Aufgaben. Werkzeuge, die in der Konzeptphase gut für erste Geometrieerzeugungen und Auslegungsrechnungen geeignet sind, z. B. SFE-Concept, sind für die Detailkonstruktion und die spezifischen Berechnungsprobleme der Serienentwicklung nicht geeignet. Phasenbezogener Einsatz von CAx-Systemen schafft allerdings auch oft Schnittstellenprobleme zwischen Datenformaten, ein wichtiger Punkt für eine durchgängige CAx-Systemkette mit einem homogenen Datenmanagement. Die Verbindung von Daten und Prozess geht über die reinen Datenformate hinaus, die Anzahl der erzeugten Dokumente mit dem entsprechenden Inhalt steigt im Verlauf der Entwicklung. Sind die Strukturen in der Konzeptphase mit wenigen Projektbeteiligten und einer überschaubaren Anzahl an globalen Produkteigenschaften [GROBMANN 1998], die betrachtet werden, noch übersichtlich, so steigt die Anzahl der Datenformate und Dokumente mit einer Vielzahl an Varianten, die das Datenmanagement vor eine große Herausforderung stellen. Die Transparenz des Prozesses ist u. a. abhängig von der Transparenz der Daten und damit der Qualität und Quantität der verfügbaren Informationen, ein funktionierendes Datenmanagementsystem mit definierten Meilensteinen und Freigabefunktionen ist somit die Voraussetzung für einen funktionierenden Entwicklungsprozess.

Schlussfolgerung und Einordnung der Arbeit in das Problemsystem

Die Integration von Konstruktion und Simulation in komplexen Produktentwicklungsprozessen lässt sich in fünf Dimensionen aufteilen, das Produkt, die Werkzeuge, die Daten, den Prozess und schließlich den Menschen. Jeder Dimension können bestimmte Teilprobleme zugeordnet werden, die zu einem besseren Verständnis der Dimensionen beitragen. Aus der Verknüpfung der Dimensionen ergibt sich ein Problemsystem und es wird deutlich, wie komplex sich die Integration von Konstruktion und Simulation für komplexe Produkte und Prozesse darstellt. Eine umfassende Lösung der Problematik für alle möglichen Produkte und Prozesse ist sicher nicht möglich und auch nicht anzustreben, weil die Flexibilität in den Entwicklungsprozessen verloren gehen würde. Die Weiterentwicklung der einzelnen Dimensionen an sich erfordert auch eher allgemeine Lösungen, die beispielsweise nicht bei einem neuen Softwarerelease keine Gültigkeit mehr besitzen. Lösungen für Detailprobleme müssen sich in den Gesamtkontext des Problems eingliedern lassen und flexibel und adaptierbar sein. Das Problemsystem zeigt auf, wo die Handlungsbedarfe bzgl. der Integration von Konstruktion und Simulation liegen und welche Problemstellungen vernetzt gelöst werden können und müssen.

Vor allem dient das Problemsystem auch dazu, bei Einzellösungen von Teilproblemen sich bewusst zu machen, dass alle Dimensionen betroffen sind und entsprechend berücksichtigt werden müssen, sonst geht die Nachhaltigkeit einer Lösung verloren. Der hauptsächliche Nutzen liegt darin, dass Probleme zielgerichtet bearbeitet werden können, das Problemverständnis und die -analyse ist hier somit bereits ein Teil der Lösung.

Die vorliegende Arbeit hat den Anspruch, sich in dem Problemsystem in die Dimensionen Produkt und Mensch einzuordnen. Grundlagen und Teilaspekte zu den Dimensionen Werkzeuge, Daten und Prozess wurden bereits in Kapitel 2 und 3 erläutert. Geliefert wird eine Methode, diese Dimensionen, die wie oben erwähnt aus Sicht der CAD-CAE-Integration von überragender Bedeutung ist, zu strukturieren und somit die notwendige Transparenz zu schaffen. Die Verbesserung der Kommunikation als zentrales Anliegen der Anwender wird im Kapitel 4 genauer untersucht, die Strukturierung des Produktes und der funktionalen Eigenschaften in Kapitel 5. Daraus wird unter Nutzung und Adaption bewährter Methoden eine Verknüpfung von Komponenten und funktionalen Eigenschaften entwickelt, die Bauteil-Lastfall-Matrix, deren Anwendungen über die reinen Dimensionen Produkt und Mensch hinausgehen. In Kapitel 6 wird die entwickelte Matrix zur Verknüpfung der Dimensionen Produkt mit dem Menschen, den Daten und dem Prozess verwendet und somit die prinzipielle Gültigkeit des gewählten Ansatzes nachgewiesen.

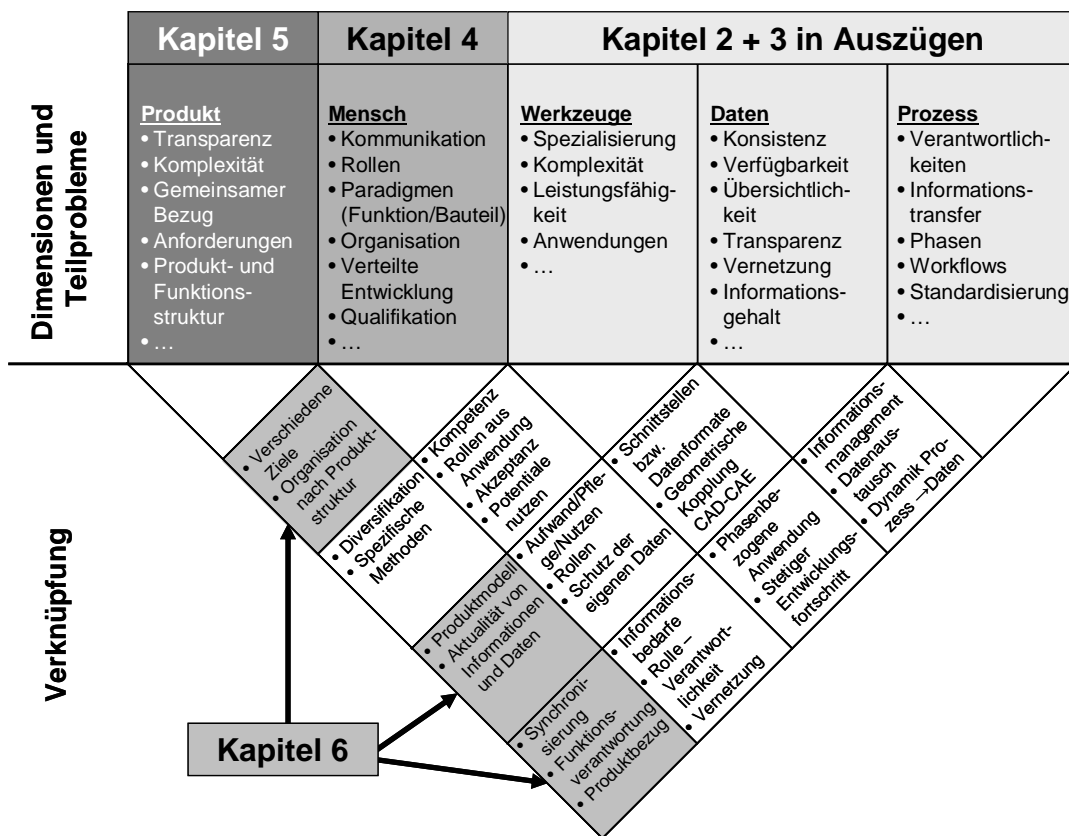


Abbildung 3-16: Einordnung der Arbeit in das Problemsystem der CAD-CAE-Integration

3.3 Zusammenfassung Kapitel 3

Im dritten Kapitel wurden die Ergebnisse einer Anwenderbefragung und einer Studie zur Kommunikation zwischen Konstruktion und Simulation in der Produktentwicklung vorgestellt und analysiert. Entscheidende Schlussfolgerung aus den Ergebnissen der Analysen ist die Vielfältigkeit des Problems der Integration von Konstruktion und Simulation, weswegen ein 5-Dimensionen-Modell entworfen wurde, das die Dimensionen Mensch, Prozess, Werkzeuge, Daten und Produkt umfasst. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich die bisherigen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der CAD-CAE-Integration vorwiegend mit den Dimensionen Daten und Werkzeuge beschäftigt haben, was aber nach den Ergebnissen der Befragungen zu kurz greift, da es sich auch sehr stark um ein Problem der Kommunikation zwischen Konstruktion und Simulation handelt.

Abgeleitet aus den Analysen wurde ein Problemsystem entwickelt, dessen Umfang nicht im Rahmen einer einzigen Arbeit abgehandelt werden kann, das aber das Themengebiet strukturiert und einen Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten geben kann. Das Problemsystem verknüpft die Dimensionen miteinander und erfüllt somit den Anspruch zur Strukturierung und Systematisierung der Handlungsschwerpunkte zur Integration von Konstruktion und Simulation. Es bildet damit einen Handlungsrahmen, innerhalb dessen die einzelnen Aktivitäten zur Optimierung der Integration von Konstruktion und Simulation in einen globalen Zusammenhang gestellt werden können. Abschließend wurde die Arbeit in das Problemsystem eingeordnet.

4. Kommunikation im Konstruktions- und Simulationsprozess

Wie in den Anwenderstudien gezeigt werden konnte, spielt die Kommunikation eine herausragende Rolle für eine effizientere Zusammenarbeit von Konstruktion und Simulation. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Aspekte der Kommunikation zwischen den Prozesspartnern in der Entwicklung analysiert und die wesentlichen Ansätze für eine Effizienzsteigerung herausgearbeitet. Schwerpunkt des Kapitels ist die Kommunikation in komplexen Netzwerken und Systemen, wie in diesem Fall der Entwicklungsprozess zwischen der Konstruktion und Simulation in der Fahrzeugentwicklung. Weiterhin werden Informationsbausteine für die Konstruktion und die Simulation definiert, die die relevanten Daten und Informationen enthalten, um entweder eine Simulation durchführen zu können oder die Ergebnisse in die Konstruktion einfließen zu lassen, also eine bidirektionale, zielgerichtete Kommunikation ermöglichen.

4.1 Definition und Bedeutung der effizienten Kommunikation in der Produktentwicklung

Im folgenden Abschnitt wird der Versuch unternommen, Kommunikation für den Entwicklungsprozess zu definieren und Erfolgsfaktoren auszumachen. ARNOLD [1997] weist darauf hin, dass die Diskrepanz zwischen der Selbstverständlichkeit der alltagsweltlichen Benutzung und der Schwierigkeit der theoretischen Erfassbarkeit der Kommunikation besonders hoch ist. Durch die Vielzahl an Definitionen und Kommunikationsmodellen²⁷, die jeweils unterschiedliche Stärken und Schwächen besitzen, wird diese Theorie noch unterstrichen, was aber für die Arbeit im Umkehrschluss bedeutet, dass hier Einschränkungen getroffen werden müssen, um die Kommunikation im Kontext der Produktentwicklung für den Konstruktions- und Simulationsprozess zu definieren.

4.1.1 Klassifikation von Kommunikation, Information und Daten

Definition der Kommunikation

Wenngleich die Kommunikation als Schlüsselfaktor der Effizienzsteigerung angegeben wurde, so wird sie doch jeweils anders verstanden. Daher wird hier der Ausdruck Kommunikation für den weiteren Verlauf der Arbeit definiert, um ein gemeinsames Verständnis zu errei-

²⁷ Vgl. BÜHRER [2003].

chen, auf dem das in Kapitel 5 und 6 geschilderte Gedankenmodell beruht. Nach SCHÖN [2000] ist Kommunikation in einer sehr allgemeinen und einfachen Form die Übertragung von Nachrichten von einem Sender zu einem Empfänger. Die Semiotik²⁸ unterscheidet drei Ebenen der Kommunikation: die Syntaktik, die Semantik und die Pragmatik [PICOT ET AL 2001], dargestellt in Abbildung 4-1. In der syntaktischen Ebene werden einzelne (physikalische) Zeichen und Signale übertragen. Den Worten und Sätzen, die aus diesen Zeichen gebildet werden, wird aber keine Bedeutung hinzugefügt. Die semantische Ebene beschäftigt sich damit, den Zeichen oder Zeichengruppen die dadurch beschriebenen Objekte zuzuweisen. Sender und Empfänger müssen die gleiche Bedeutungszuweisung vornehmen, um eine erfolgreiche Kommunikation zu gewährleisten. Die pragmatische Ebene ist dafür zuständig, welche Wirkung die gesendeten Zeichen mit ihrer Bedeutung beim Empfänger hinterlassen und welche Wirkung vom Sender beabsichtigt war. Auf allen Ebenen muss Übereinstimmung zwischen den gedanklichen Modellen von Sender und Empfänger herrschen, um zu einem erfolgreichen Informationsaustausch zwischen Wissensträgern zu kommen.

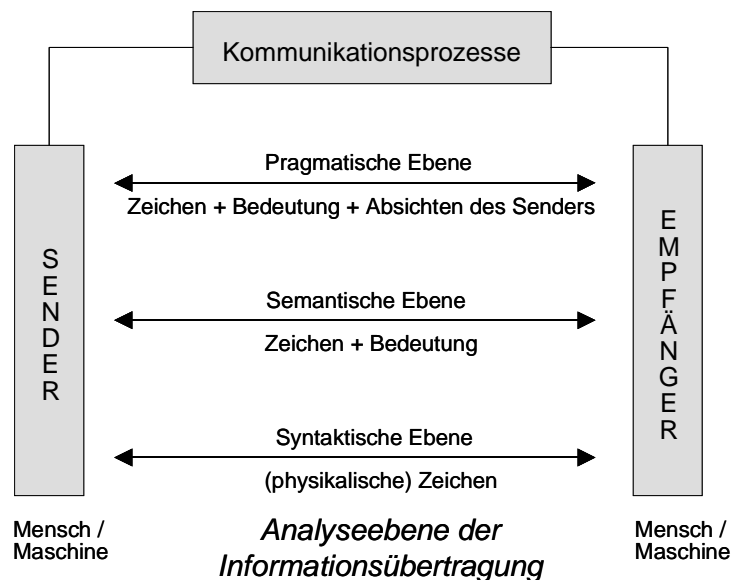


Abbildung 4-1: Kommunikationsmodelle nach PICOT ET AL [2001]

DAENZER & HUBER [2002] teilen die Kommunikation in der Teamarbeit im Rahmen des Projektmanagements in drei Ebenen: die Sach-, die Methoden und die Beziehungsebene. Dabei sind die Sach- und Methodenebene die erste und die Beziehungsebene die zweite Dimension, wobei sich der Beziehungsanteil in die Ausdrucks-, Befindlichkeits-, Begegnungs- und Beziehungsebene gliedern, die die jeweilige Persönlichkeit des Kommunizierenden berücksichtigt. SHANNON & WEAVER [1949] haben sich der Untersuchung der Kommunikation von der

²⁸ Als Semiotik wird die wissenschaftliche Erforschung der Gegenstände und Funktionsweisen der Kommunikation verstanden, die Wissenschaft vom Ausdruck [DROSDOWSKI 1990].

mathematischen Seite angenähert und ein Kommunikationsmodell entworfen, das der mathematischen Theorie der Signalübertragung folgt²⁹. Das Modell ist auf den ersten Blick recht einfach, dargestellt in Abbildung 4-2, aber bei näherer Betrachtung hervorragend geeignet, die Schwierigkeiten der Kommunikation zu erläutern. Durch die eigenen Verarbeitungsstationen von Sender und Empfänger bzw. Informationsquelle und Ziel, wird die Botschaft verzerrt, so dass das abgegebene Signal nicht mehr notwendigerweise dem Empfangenen entspricht [ARNOLD 1997]. Die Verzerrung durch Sender und Empfänger verstärkt sich oder schwächt sich ab, je nachdem, wie die zweite Dimension, also die Beziehungsebene, funktioniert. Der Stör-sender, bei SHANNON & WEAVER [1949] ursprünglich als Repräsentation der Signalübertragung durch Leitungen, etc. gedacht, kann z. B. die Beziehungsebene repräsentieren, aber auch eine äußere Störung ausdrücken. Dies zu untersuchen ist nicht Gegenstand der Arbeit, daher wird die Beziehungsebene völlig ausgeblendet. Dass dies in der Praxis im Umgang mit Menschen nicht zulässig ist, liegt auf der Hand und wurde auch in Kapitel 3 durch die besondere Bedeutung der Dimension Mensch im definierten Handlungssystem nachgewiesen, jedoch geht es an dieser Stelle um die Übertragung von Daten und Informationen zwischen Konstruktion und Berechnung, nicht um die Kommunikation im Entwicklungsprozess im Allgemeinen.

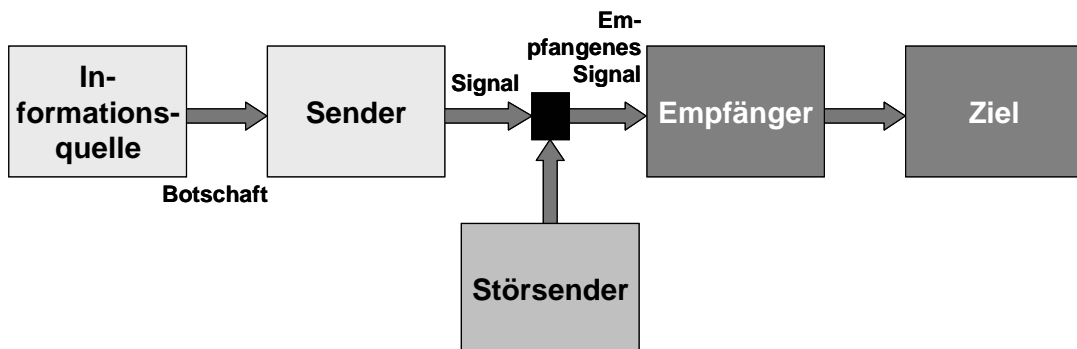


Abbildung 4-2: Das technische Kommunikationsmodell nach SHANNON & WEAVER [1949]

²⁹ Das Modell von SHANNON & WEAVER [1949] ist eine Beschreibung der Signalübertragung im technischen Sinne, die Deutung für die zwischenmenschliche Kommunikation erfolgte erst später. KANNETZKY [2002] weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass es wegen der Herkunft des Modells nach SHANNON & WEAVER [1949] auch fraglich ist, ob das Modell so unterschiedliche Dinge repräsentieren kann wie technische Signalübertragung und ein Gespräch zwischen Menschen.

Differenzierung von Informationen, Daten und Wissen

Nach der Definition der Kommunikation im vorigen Kapitel wird nun der Zweck der Kommunikation detaillierter betrachtet³⁰: die Abgabe, Übermittlung und Aufnahme von Informationen durch menschliche oder maschinelle Informationsträger [MÜLLER 1995]. Dazu muss aber unterschieden werden in Daten, Informationen und Wissen, denn die drei Begriffe sind im Kontext der Produktentwicklung in ihren Definitionen sehr verschieden. PLÜMER [2000] differenziert den Bedeutungsgehalt von Daten, Informationen und Wissen folgendermaßen:

- Zeichen: alle verfügbaren Zeichen, ausgenommen Symbole, denen eine Semantik innewohnt
- Daten: nichtinterpretierbare Zeichen (-ketten) und Symbole
- Informationen: Daten, die durch Interpretation und Strukturierung mit einer Semantik versehen werden
- Wissen: ordnet Daten eine Bedeutung zu, so dass aus ihnen Informationen werden. Dazu kommt die aus dem Wissen resultierende Handlungsfähigkeit in Form von Schlussfolgerungen und Aktivitäten

Nach DIN 44300 [1982] werden die Arten der Information unterschieden: Träger (Daten), Inhalt und Zweck der Information, wobei der Interpretation und Weiterverarbeitung weniger Aufmerksamkeit geschenkt wird. Nach IRLINGER [1998] hängen Daten, Information und Wissen zusammen, wie in Abbildung 4-3 dargestellt, der Übergang dazwischen ist fließend. Mit dem erarbeiteten Wissen können Entscheidungen gefällt werden [SCHWANKL 2002], die letztlich zum täglichen Arbeitsinhalt des Ingenieurs gehören: Entscheidungen über die Gestalt und Eigenschaften eines Bauteils zu fällen und dabei über genügend Wissen um die notwendigen Randbedingungen zu verfügen. Im Kontext der Integration von Konstruktion und Simulation sind Daten beispielsweise die CAD-Daten und die FE-Netze, Informationen sind in den Datensätzen enthaltene Bauteilparameter, Werkstoffkennwerte, etc., während Wissen letztlich bedeutet, mit den Informationen etwas anfangen zu können, d. h. auf ihrer Basis Optimierungen vornehmen zu können, Interpretationen durchzuführen, z. B. über das reale Bauteilverhalten, und im Entwicklungsprozess gestalterisch tätig zu sein und Entscheidungen auf Grundlage des Wissens zu fällen.

³⁰ Auch hier sei der Vollständigkeit halber angemerkt, dass eine Vielzahl von Definitionen existiert, die sich durchaus unterscheiden, daher wird die dem Autor als die am sinnvollsten Erscheinende ausgewählt.

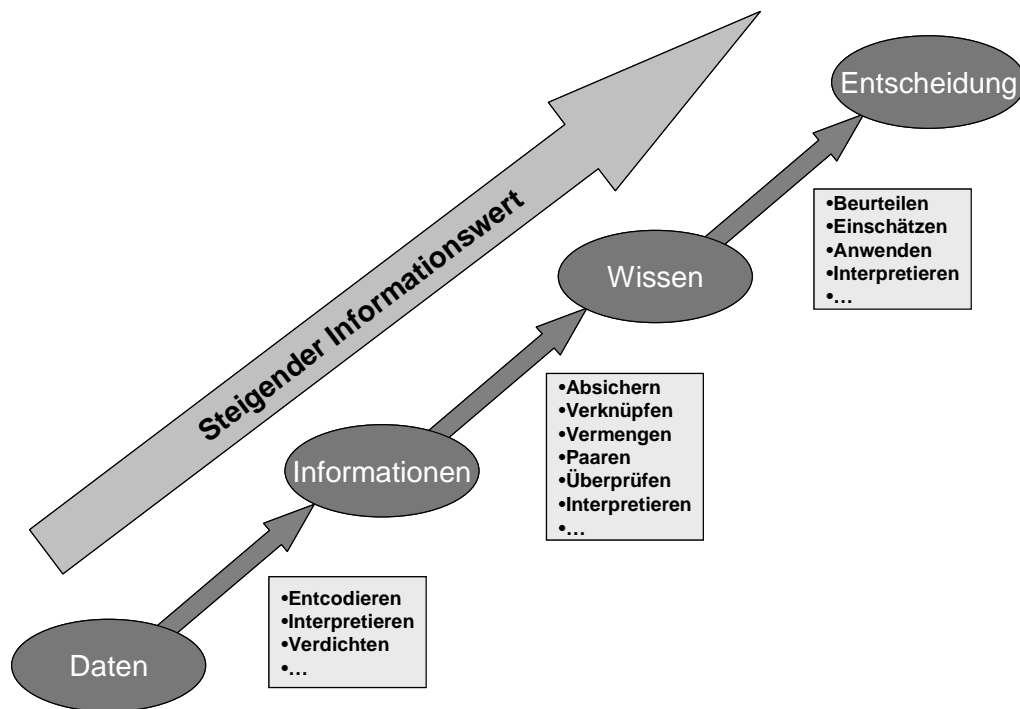


Abbildung 4-3: Zusammenhang zwischen Daten, Informationen und Wissen [NACH IRLINGER 1998]

Um diese Entscheidungen fällen zu können, ist die zielgerichtete Versorgung und Bereitstellung der benötigten Informationen von zentraler Bedeutung für einen effizienten Entwicklungsprozess. Vor dem Hintergrund, dass Ingenieure einen erheblichen Teil ihrer Zeit mit der Suche nach Informationen verbringen und die Menge der verfügbaren (nicht die notwendigen!) Informationen sich ständig vergrößert, steigt die Bedeutung eines wirksamen Informationsmanagements in den Unternehmen deutlich an. PAHL & BEITZ [2003] leiten daraus folgende Kriterien zur Kennzeichnung von Informationen ab:

- Zuverlässigkeit
- Freiheitsgrad
- Schärfe
- Wichtigkeit für den Empfänger
- Aktualität

Überlagert wird diese Einteilung von den subjektiven und objektiven Informationsbedarfen [PICOT ET AL 2001], d. h. was braucht der Anwender für die Lösung einer bestimmten Aufgabe an Informationen und was meint er zu brauchen. Aufgabe eines effizienten Informationsmanagements ist es, den objektiven an den subjektiven Bedarf anzunähern, was stark von der Komplexität und Struktur der zu erledigenden Aufgabe abhängt. Das Modell von SHANNON &

WEAVER [1949] gekoppelt mit der Anordnung von Daten, Informationen und Wissen bedeutet für den Informationstransfer, dass Informationen sehr stark objektivierbar gemacht werden müssen, um den Austausch effizient zu gestalten. Nach dem Modell der Kommunikation aus Abbildung 4-1 bedeutet das, dass die semantische und syntaktische Ebene der Kommunikation möglichst wenig fehleranfällig sein dürfen, da auf der pragmatischen Ebene durch den starken Einfluss des Menschen mit seinen Gefühlen und Empfindungen die übertragenen Informationen verzerrt werden.

4.1.2 Technische Unterstützung der Kommunikation in der Produktentwicklung

Wie gezeigt wurde, kommt dem Informationsmanagement als Unterstützung für die Kommunikation und damit dem Austausch von Daten und Informationen hohe Bedeutung zu. Eine Möglichkeit dazu bietet Computer Supported Cooperative Work (CSCW), dessen Ziel die synchrone Kommunikation, Kooperation und Koordination von und zwischen Menschen mithilfe von EDV-Systemen ist. Einige der vorgeschlagenen Systeme haben sich durchgesetzt, andere wiederum sind noch nicht über das Forschungsstadium hinausgekommen.

BENDER [2001] unterteilt die CSCW-Systeme wie folgt:

- Kommunikationsunterstützungssysteme, wie z. B. E-mail, Messaging-Systeme, Konferenz-Systeme, Screen Sharing, Audio und Video-Konferenzen
- Koordinationsunterstützungssysteme, wie z. B. Workflow-Systeme, Koordinations-systeme, Kalendersysteme
- Kooperationsunterstützungssysteme, wie z. B. Multiuser Editors, Group Decision Support Systeme
- Informationsunterstützungssysteme, wie z. B. Face-to-Face Facilitation Services, Intelligent Agents, Gruppen-Wissensbasen

Weiterhin unterscheidet BENDER [2001] nach synchronen und asynchronen Systemen und gleichem und unterschiedlichem Ort. Es lassen sich für die Kommunikation also je nach Bedarf und Randbedingungen passende Systeme auswählen. Ein System, das diese Einteilung in einem System integriert ist COVISE (Collaborative Visualization and Simulation Environment), in dem neben der schnellen Darstellung von Simulationsergebnissen auch die Bereitstellung multimedialer Kommunikationstechniken unterstützt wird. Ein speziell für die Unterstützung der verteilt kooperativen Arbeitsweise in der Simulation einer Fahrzeugentwicklung entwickeltes System ist COVAS (Collaborative Visualization of Automotive Simulation), das auf COVISE basiert und eine Verknüpfung der an einer Fahrzeugentwicklung beteiligten Partner unterstützen soll. Viele Systeme der Kommunikationsunterstützung zielen auf die verteilt-kooperative Arbeitsweise in der Entwicklung, und es lässt sich feststellen, dass der technische Stand der Kommunikationsmöglichkeiten ein sehr hohes Niveau erreicht hat und selten ein Hindernis für die Übertragung von Daten und Informationen darstellt.

4.1.3 Definition der effizienten Kommunikation

Welche Bedeutung der effizienten Kommunikation zukommt, lässt sich daran erkennen, dass nicht primär die technischen Probleme im Vordergrund stehen, sondern die Schwierigkeiten bei der effektiven Gestaltung der Zusammenarbeit liegen [FRANKENBERGER 1997], wie dies auch aus der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Umfrage hervorgeht. BÜHRER [2003] definiert zehn Erfolgsfaktoren für die Kommunikation in der Praxis, u. a. Transparenz, direkten Kontakt statt nur die Kommunikation via technischer Hilfsmittel, etc. MAST [2000] sieht vor allem in der exakten Definition eines Kommunikationsvorganges, in der sorgfältigen Auswahl des Verteilers beim Versand von elektronischen oder gedruckten Briefen, und in der präzisen Definition von Zielen der Kommunikation die Erfolgsfaktoren einer effizienten Kommunikation. FRANKENBERGER [1997] sieht Informationsverfügbarkeit und Kommunikation, die nicht trennbar sind, sondern voneinander abhängen, als die am häufigsten auftretenden Variablen im Konstruktionsprozess, die es zu optimieren gilt. Es wird viel Zeit im Entwicklungsprozess darauf verwendet, sich Informationen zu beschaffen, bzw. sich Daten zu beschaffen und daraus die Informationen zu entnehmen. FRANKENBERGER [1997] weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass gerade in komplexen Situationen Konstrukteure (und sicher auch Berechner) konstante und verlässliche Informationen suchen, die die Situation nicht weiter komplizieren. Vernachlässigt man nun die psychologischen Aspekte der Kommunikation und konzentriert sich auf die übertragenen Daten und Informationen, so lässt sich daraus eine Definition für eine effiziente Kommunikation für den Entwicklungsprozess zwischen Konstruktion und Simulation ableiten: effiziente Kommunikation bedeutet, dass die richtigen Daten und Informationen strukturiert und standardisiert an den richtigen Anwender verteilt werden und es einen Fluss von Daten und Informationen in beide Richtungen gibt.

4.1.4 Schlussfolgerungen für die Kommunikation zwischen Konstruktion und Simulation

Die Kommunikation zwischen Konstruktion und Simulation im Entwicklungsprozess dient einem bestimmten Zweck, der Übertragung von Daten und Informationen und der Generierung von Wissen auf dieser Grundlage. Entscheidungen über die Gestalt von Produkten können nur auf Basis dieses Wissens gefällt werden, daher ist es immens wichtig, den Kommunikationsprozess zwischen Konstruktion und Simulation in beide Richtungen zu untersuchen, mögliche Störungen zu finden und diese zu beseitigen. Kommunikation beschränkt sich nicht nur auf die bloße Übertragung von Daten, sondern wird, wie oben gezeigt, von zahlreichen weiteren Faktoren und damit Störungen beeinflusst. Sie ist aber gleichzeitig wichtig, um die gewünschten Ergebnisse zu erzeugen (siehe Kapitel 3.1.1), so dass sichergestellt sein muss, dass für alle Prozessbeteiligten die notwendigen Daten und Informationen bereitgestellt werden, damit sie daraus Wissen erzeugen können, dass wieder in den Prozess als Informationen für weitere Beteiligte einfließt und auf dieser Basis Entscheidungen über die Ausprägungen des Produktes gefällt werden können. Die Schlussfolgerung für eine effiziente Kommunikation ist, dass nur die Daten und Informationen zu den Prozessbeteiligten gelangen, die diese auch als Grundlage für ihre Arbeit benötigen, also eine zielgerichtete Streuung von Daten und Informationen in komplexen Entwicklungsprozessen.

4.2 Analyse der Kommunikation in komplexen Strukturen

4.2.1 Faktoren der Kommunikation in komplexen Strukturen

Wie in Kapitel 4.1.1 gezeigt, gehen die meisten Kommunikationsmodelle von einem Sender und einem Empfänger aus. Interpretiert man die Kommunikation so, wie sie im Kontext der Arbeit in Kapitel 4.1.4 definiert wurde, so kommt dem Aspekt der Zugänglichkeit und Verteilung von Informationen hohe Bedeutung zu. In der Konstruktion und Berechnung von komplexen Produkten wie einem Fahrzeug sind viele Menschen, vgl. Kapitel 2.1.2, in unterschiedlichen Rollen und Verantwortlichkeiten, je nach Entwicklungsphase mehr oder weniger intensiv beschäftigt.

Für die Kommunikation in komplexen Strukturen lassen sich generell folgende Faktoren als ausschlaggebend festlegen:

- Menschen
- Organisationsformen
- Informationssysteme

Alle weiteren Einflussgrößen, wie Art der Informationen, Struktur, etc., lassen sich auf diese drei Eckpunkte zurückführen. Den Menschen in seinem Kommunikationsverhalten zu untersuchen und zu trainieren ist Gegenstand anderer Disziplinen. Im Zusammenhang der Arbeit ist der Mensch im Zusammenhang mit der Organisationsform und durch die Anzahl der am Entwicklungsprozess aus Konstruktion und Simulation beteiligten Entwicklungsingenieure zu verstehen. Die Anzahl ist wichtig, denn dadurch geht die Übersicht verloren. Häufig sind Ansprechpartner nicht bekannt und Informationen werden zwar breit gestreut, z. B. mit E-Mails, aber die schiere Masse der Informationen überfordert die Menschen und es ist nicht bekannt, wer die Informationen überhaupt benötigt. Umgekehrt ist es oft schwer herauszufinden, wer aktuell über die notwendigen Informationen verfügt, die als Grundlage für die eigene Arbeit benötigt wird. Diese Tatsache wird durch die in Kapitel 3.1 durchgeführten Anwenderbefragungen eindrucksvoll bestätigt.

Für die Organisation von Unternehmen gibt es viele verschiedene Strategien, hierarchisch, modular, etc., [VGL. REICHWALD ET AL 1998], die den Arbeitsprozess mehr oder weniger fördern. SCHÖN [2000] stellt fest, dass virtuelle und modulare Organisationen deutlich gestärkt werden, was in der Konsequenz bedeutet, dass Informations- und Wissensmanagement angepasst werden müssen. Wissens- und Informationsträger sind sowohl organisatorisch als auch räumlich verteilt, so dass die Vermittlung von Wissen und Informationen durch die persönliche Kommunikation erschwert wird. Angesichts der Anzahl an Ingenieuren in der Konstruktion und Simulation ist eine Organisation, die diese zusammenfasst, ohnehin unrealistisch. Das bedeutet, dass eine Integration von Konstruktion und Simulation nicht durch organisatorische Umgestaltung gelöst werden kann, sondern unabhängig von der Organisationsform funktionieren muss. KREIMEYER ET AL [2006A] weisen darauf hin, dass die starre Organisationsform in einem Unternehmen eher hinderlich für die Integration von Konstruktion und Si-

mulation sind, da z. B. die Definition von gemeinsamen Zielen über die Abteilungsgrenzen hinweg schwerer wird.

Informationssysteme lassen sich nach SEIDEMANN [2001] in drei Kategorien einteilen: Betriebswirtschaftliche, Büro- und Technische Informationssysteme. Von vorrangigem Interesse für die Konstruktion und Simulation sind die Technischen, also z. B. CAD-, CAE- und PDM-Systeme, sowie die Büro-Informationssysteme, wie z. B. E-Mail, Workflow, etc. Ruft man sich die Tabelle 3-1 in Erinnerung, in der die Medien zur Übertragung von Daten und Informationen zwischen Konstruktion und Simulation in ihrer ganzen Breite dargestellt sind, so wird klar, dass hier eine gewisse Formalisierung notwendig ist. Zumal die unterschiedlichen Systeme auch mit unterschiedlichen Datenformaten arbeiten, als bereits genanntes Beispiel die Übertragung von CAD-Daten in die Berechnung und umgekehrt. Der Aufwand für die Informationsbeschaffung und die Formalisierung der Informationen sind gegenläufige Kurven, d. h. je höher der Formalisierungsgrad umso geringer der Aufwand der Beschaffung und umgekehrt [STORATH 1996]. Angesichts der Vielzahl an Informationen, die ein Konstrukteur und ein Berechner täglich als Basis für ihre Arbeit benötigen, ist eine Formalisierung und Strukturierung der Daten und Informationen jedoch unerlässlich, zumal der Aufwand für die Formalisierung nur einmal anfällt, die Daten und Informationen aber beliebig oft genutzt werden können.

4.2.2 Folgerungen für den Kommunikationsprozess zwischen Konstruktion und Simulation

Aus den drei Faktoren und deren Ausprägungen lassen sich bestimmte Folgerungen und Fragestellungen für die Kommunikation zwischen Konstruktion und Berechnung ableiten. Diese Folgerungen sind bei den Integrationsansätzen zu berücksichtigen.

- Organisationsstrukturen spielen eine untergeordnete Rolle bei der Integration von Konstruktion und Simulation. Sie können den Arbeitsprozess unterstützen, in der Regel hemmen sie ihn aber eher wegen verteilter Verantwortung, fehlenden gemeinsamen Zielen, Abteilungsgrenzen, unklare Zuständigkeiten, etc.
- Informationsflüsse müssen gesteuert und gefiltert werden. Durch die große Anzahl an beteiligten Menschen im Prozess muss sichergestellt sein, dass die richtigen Informationen an die richtige Stelle kommen. Hier gilt es mit den gestiegenen Verteilungsmöglichkeiten durch beispielsweise Datenbanken und E-Mail verantwortungsvoll und effizient umzugehen. Mit der gestiegenen Menge an verfügbaren Informationen wird die Identifizierung der relevanten Informationen für die einzelnen Personen immer schwieriger, da die Bandbreite der Informationen von eher allgemeinen Inhalten bis zu konkreten Teilergebnissen, die als Basis für die eigene Arbeit benötigt werden, reicht [HENRICH & MORGENROTH 2006].
- Informationen müssen einen hohen Formalisierungsgrad aufweisen. Dies hat zwei Vorteile: erstens werden die Informationen leichter zugänglich und zweitens ist die Wahrscheinlichkeit, dass Daten falsch interpretiert werden und daraus falsche Informationen werden, siehe dazu Abbildung 4-3, deutlich geringer.

- Die Bereitstellung von Informationen muss formalisiert werden. Nach MARKWORTH [2002] stellen viele Konstrukteure ihre Konstruktionsdaten erst mit einer gewissen Reife, die nach subjektiven Kriterien definiert wird, dem Arbeitsprozess und damit auch der Berechnung zur Verfügung. Das bedeutet, dass es auch keine Ergebnisse gibt. Umgekehrt haben die Umfragen aus Kapitel 3.1 bestätigt, dass auch die Berechner nicht alle ihre Ergebnisse offen kommunizieren und zur Verfügung stellen.

Die o.g. Folgerungen werden bei den vorgestellten Lösungsansätzen im Kapitel 6 teilweise wieder aufgegriffen, im folgenden Kapitel wird ein Ansatz vorgestellt, der Daten und Informationen formalisiert, und zwar nicht im Sinne eines gemeinsamen Datenformates, das wird nicht möglich sein, aber in Form von Bausteinen, die die relevanten Informationen für die Konstruktion und Simulation enthalten. Dem vorgeschaltet wird eine Prozessanalyse, um die für die Konstruktion und Berechnung relevanten Informationen überhaupt definieren zu können.

4.3 Informationsflüsse und -verarbeitung in der Konstruktion und Simulation

In der folgenden Prozessanalyse zu den Daten- und Informationsflüssen geht es darum, die in eine Berechnung schwerpunktmäßig einfließenden und wieder herausfließenden Informationen zu analysieren und grob einzuteilen. Dabei wird auf die Abbildung 3-11 Bezug genommen, in der der Informationskreislauf bereits dargestellt ist. Die hohe Bedeutung des Informationskreislaufes ist in etwa abzuschätzen, wenn man sich vor Augen führt, dass ca. 80% der Bearbeitungszeit in der Simulation darin besteht, das FEM-Modell aufzubauen und zu validieren, wofür natürlich viele Informationen notwendig sind, die nicht aus dem CAD-Modell bzw. bereits vorhandenen FEM-Modellen entnommen werden können [MOCKO ET AL 2003]. Dabei gilt es stets zu berücksichtigen, dass das CAD-Modell die Geometrie, während das FEM-Modell einen Teil der Eigenschaften des Produktes repräsentiert, die Inhalte der Daten also notwendigerweise verschieden sein müssen und auch unter völlig anderen Gesichtspunkten aufgebaut werden. Dies ist besonders wichtig, denn bedingt durch die eng terminierten Entwicklungsabläufe kann sich die Berechnung von der Konstruktion informationstechnisch entkoppeln und damit eine Datenkonsistenz nicht mehr durchgängig gewährleistet werden [FORSEN ET AL 2002], was sicherlich durch den Umstand, dass die Konstruktion meist die Freigabeverantwortung hat, verstärkt wird.

Diese Gefahr der Inkonsistenzbildung multipliziert sich mit der Anzahl der verschiedenen Berechnungsdisziplinen und verstärkt sich dadurch, dass im Laufe der Serienentwicklung einzelne Bauteile eines neueren Konstruktionsstands in ältere Modelle mit geringer Absprache der Disziplinen untereinander eingebaut werden [GÖSSING 2000]. Die Folge daraus ist die mangelnde Vergleichbarkeit der verschiedenen Simulationsergebnisse, die auf unterschiedlichen, nicht nachvollziehbaren Rechenmodellen beruhen. Dieser Mangel im Informationsfluss ist in der Konzeptentwicklung, in der der funktionale Reifegrad des Entwicklungsprojekts noch niedrig ist und die Vergleichbarkeit der Modelle eine unbedeutendere Rolle spielt [SCHELKLE & ELSENHANS 2000, SCHLENKRICH ET AL 2000], noch nicht deutlich spürbar. In

der Serienentwicklung, wenn der Detaillierungsgrad der Modelle auf beiden Seiten, Konstruktion und Simulation, sehr hoch ist, dann können diese Inkonsistenzen zu Fehleinschätzungen bzgl. der Funktionen bzw. Eigenschaften des Produktes führen, die nur über teure und aufwendige Änderungsschleifen beseitigt werden können. In Abbildung 4-4 ist dies am Beispiel zweier Lastfälle gezeigt: bei den Berechnungsmodellen handelt es sich keineswegs um ein einheitliches Modell für alle Lastfälle, sondern es werden aus den aus dem CAD-Prozess ausgeschleusten Daten Partialmodelle für die verschiedenen Berechnungsdisziplinen gebildet, die parallel zum CAD-Konstruktionsprozess gepflegt und gespeichert werden müssen. Dazu kommt, dass nicht jede Bauteil-Änderung für jeden Lastfall dieselbe Bedeutung hat, so dass sich die Aktualisierung der Partialmodelle nicht parallel vollzieht. Nach SCHICHEL [2002] liegt es oft am Ermessen des Ingenieurs, ob und wann eine neue Version eines Bauteils für die anderen am Prozess beteiligten Partner zur Verfügung gestellt wird, was die Konsistenz auf der Berechnungsseite erschwert. Umgekehrt ist der Konstrukteur durch die zeitlich versetzte Rückführung von Ergebnissen in den Konstruktionsprozess in einem ständigen Änderungsprozess, da sich die Resultate der Simulation aus den unterschiedlichen Lastfällen zu verschiedenen Zeitpunkten ergeben [DUNGS ET AL 2006].

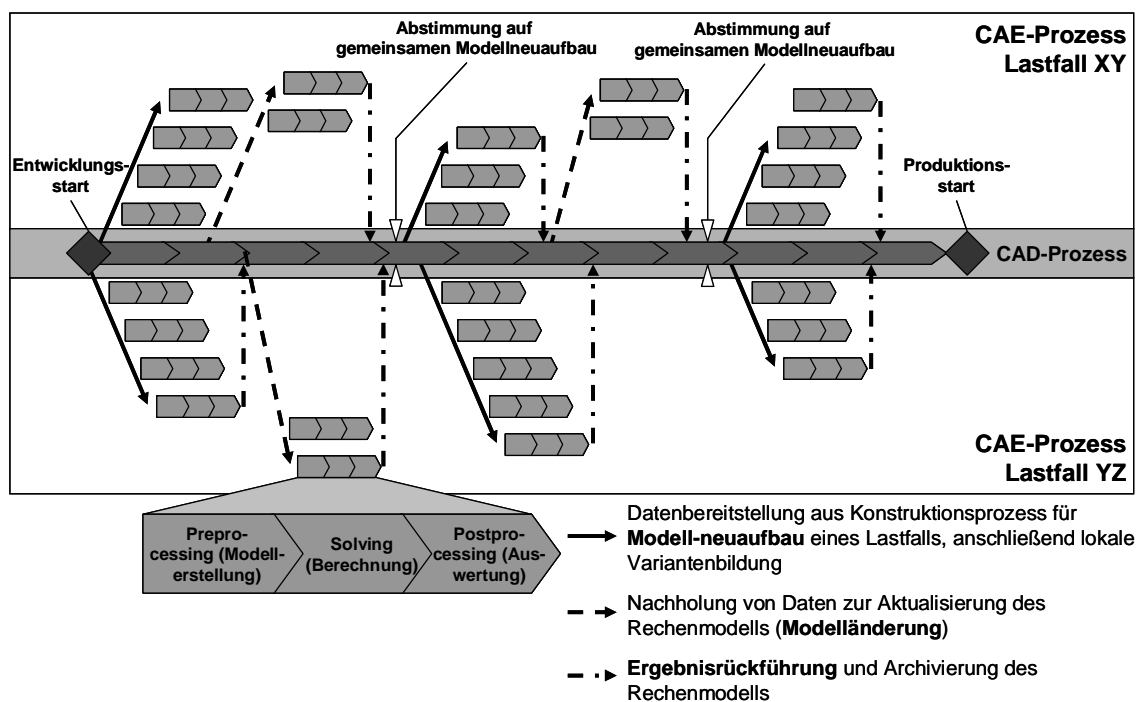


Abbildung 4-4: Zusammenspiel der Berechnungsdisziplinen untereinander, dargestellt am Beispiel zweier Lastfälle

Damit wird klar, welche Bedeutung dem Daten- und Informationstransfer zwischen Konstruktion und Simulation zukommt. Im Folgenden werden daher die Inhalte und Art der übertragenen Informationen und Daten in Kürze dargestellt und anschließend der Verarbeitungsprozess der Informationen in Konstruktion und Simulation diskutiert.

4.3.1 Inhalt und Art der übertragenen Daten und Informationen

Um nachvollziehen zu können, welche Daten und Informationen die Berechnung zum Aufbau eines Rechenmodells benötigt, muss erst der Aufbau eines CAE-Modells detaillierter analysiert werden, um zu definieren, welche Informationen wann in den Prozess einfließen müssen. Basis für die Informationen bilden nach der Definition in Kapitel 4.1.1 die Daten, die sich nach der in Abbildung 4-5 gezeigten Einteilung kategorisieren lassen: geometrische Produktdaten und Stammdaten, die Metadaten und nicht-geometrische Daten enthalten. Geometrische Produktdaten sind z. B. 3D-CAD-Modelle, Metadaten sind nach der VDI-RICHTLINIE 2219 [1999] beschreibende, klassifizierende bzw. attributive Informationen zur Verwaltung und Organisation von Dateien. Da die geometrischen Daten nur die Geometrie, nicht aber die physikalischen Eigenschaften eines Produktes beschreibt, ist eine Trennung der Produktbeschreibung in physikalische und geometrische Daten notwendig [AMFT 2002]. Nicht-geometrische Daten beschreiben daher Größen wie Masse, Schwerpunkt, Kennlinien, etc. PULM [2004] erweitert für die Entwicklung individualisierter Produkte die Produktdaten um die Kategorie Schnittstellen, wobei damit nicht die Datenschnittstellen, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, gemeint sind. Schnittstellen sind somit ebenfalls Bestandteil der Produktdaten und beschreiben die Verbindung von zwei oder mehreren Komponenten [PULM 2004]. Die Schnittstelleninformationen sind in den geometrischen und den Stammdaten meist enthalten, z. B. Verbindungstechnik, Produktstruktur, etc. Sie bilden die Grundlage für modulare Produktarchitekturen, da die konstruktive Schnittstellengestaltung maßgeblich die physische Abhängigkeit von Komponenten definiert [GÖPFERT 1998]. Erweitert man den Schnittstellenbegriff um die Relationen zwischen Komponenten, so spielen die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften von Komponenten eine zentrale Rolle für die Integration von Konstruktion und Simulation, wie in Kapitel 5 zu zeigen sein wird.

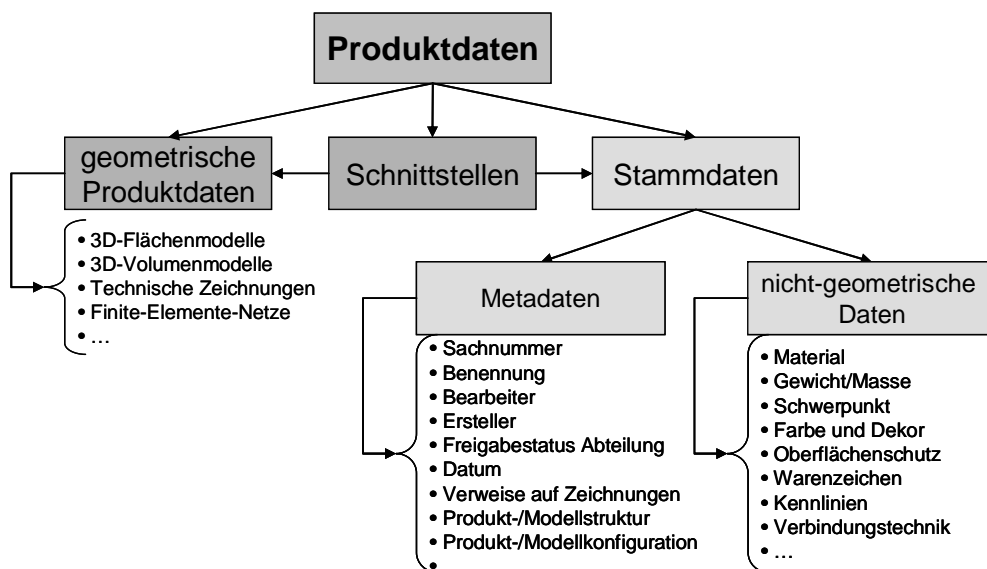


Abbildung 4-5: Klassifizierung von Produktdaten

4.3.2 Informationsfluss- und -verarbeitungsprozess

Einen allgemeinen Ansatz zur Modellierung des Informationsflusses in der Produktentwicklung stellen SHOOTER ET AL [2000] vor, der in Abbildung 4-6 dargestellt ist. Mit dem Modell soll der wachsenden Informationsflut in komplexen Entwicklungsprozessen und auch der Bandbreite der Informationen Rechnung getragen werden, vor allem da die gängigen Rechnersysteme sich auf den Austausch von geometrischen Informationen beschränken und die zahlreichen nicht-geometrischen Informationen, die während der Entwicklung kreiert werden, vernachlässigen. Der Informationsfluss ist hier allerdings sehr grob repräsentiert, ein Modell, das sich in der Praxis des Entwicklungsalltages deutlich komplexer darstellt (vgl. dazu die Prozessdarstellung in Abbildung 2-20, die versucht einen realen Entwicklungsprozess mit seinen Vernetzungen abzubilden), zumal der Parallelität heutiger Entwicklungsprozesse nicht entsprochen wird. Der prinzipielle Ablauf von den Kundenanforderungen, die in ein Lastenheft (und damit erst in einen Lastfall für die Simulation) übersetzt werden bis zu dem iterativen Vorgehen in der Simulation, in der Lösungen bewertet und ausgewählt werden müssen, ist der Prozess aber auf jedes beliebige Produkt übertragbar, lediglich die Komplexität und Parallelität der Prozesse steigen stark an, wenn es sich um hochkomplexe Produkte wie z. B. ein Fahrzeug handelt.

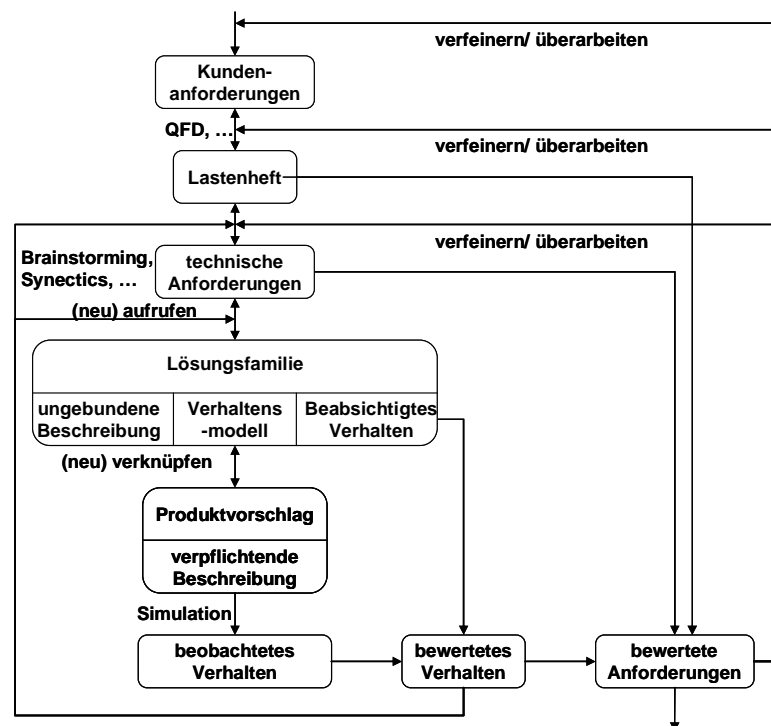


Abbildung 4-6: Modell des Informationsflusses im Entwicklungsprozess
[SHOOTER ET AL 2000]

Bei komplexen Produkten zeigen sich die vielfältigen Abhängigkeiten der Konstruktions- und Simulationsingenieure untereinander. Dadurch werden die Wege des Daten- und Informationsaustausches schnell intransparent und unklar, was in der Folge zu einer ineffizienten Kommunikation führt. In Abbildung 4-7 ist der Informationstransfer zwischen Konstruktion und Simulation nach HERFELD ET AL [2006] dargestellt: es ist eine Fülle von Informationen vorhanden, von denen ein Teil an die Simulation weitergegeben werden und dort ein Mehr an Informationen in Form von Ergebnissen kreiert wird. Ein Teil dieser Informationen fließt wieder zurück an die Konstruktion als Ergebnisrückführung, wobei MAIER ET AL [2006] im Rahmen der in Kapitel 3.1.2 vorgestellten Kommunikationsstudie nachweisen, dass in hohem Maße Unverständnis und Unwissen über die Informationsbedarfe der jeweiligen Prozesspartner in Konstruktion bzw. Simulation besteht.

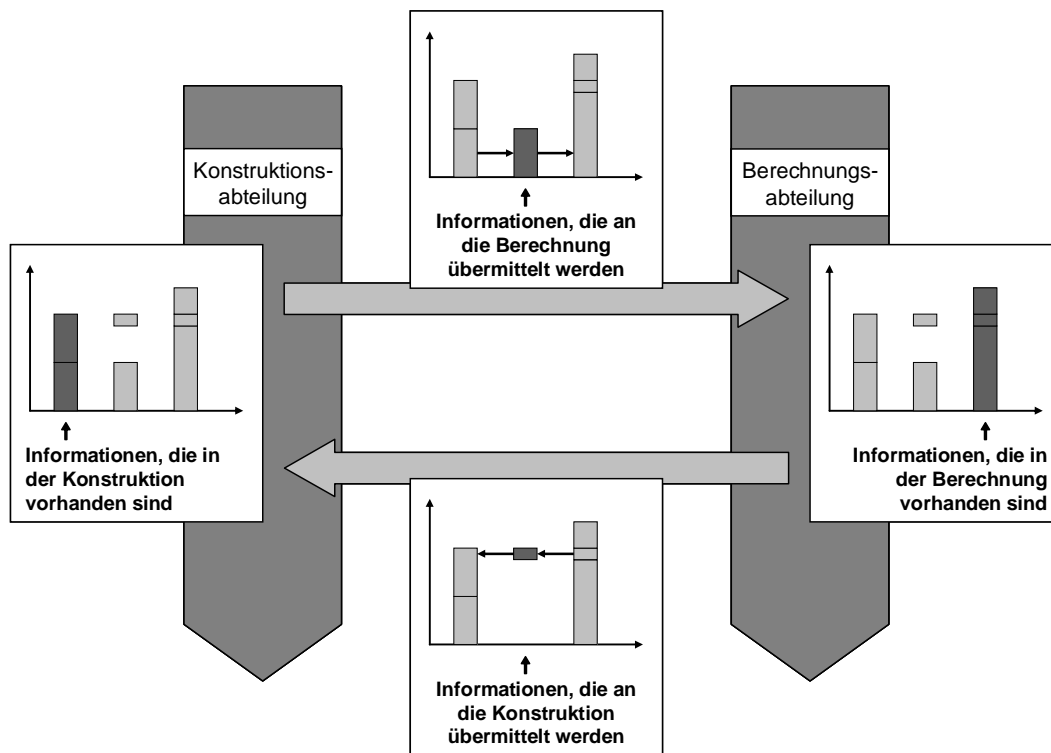


Abbildung 4-7: Informationserstellung und -transfer zwischen Konstruktion und Simulation [HERFELD ET AL 2006]

4.3.3 Definition von Informationsbausteinen

Informationsfluss von der Konstruktion in die Simulation

Ein zentraler Teil des Daten- und Informationsflusses in die Simulation ist die CAD-Datenbereitstellung, da die CAD-Daten die geometrische Basis für das Simulationsmodell

bilden. In Kapitel 2.3.2 wurde bereits auf die unterschiedlichen Informationsgehalte der CAx-Modelle hingewiesen und erläutert, dass die Simulation deutlich mehr Informationen benötigt, um ein Modell aufzubauen, als in den CAD-Daten nach dem Stand der Technik enthalten sind. Die in Abbildung 4-5 als Stammdaten bezeichneten Daten und Informationen sind für die Berechnung von hoher Bedeutung, leider sind sie dem Konstrukteur oft selbst nicht bekannt³¹, so dass es hier weiterer Informationsquellen bedarf, um diese Informationen zu sammeln.

Nach WEHLITZ [2000] ist das Bewusstsein der Informations- und Datenflüsse von großer Bedeutung, um Transparenz in bestehende Abläufe zu bringen und Prozessverbesserungsmaßnahmen zu entwickeln. Um den Prozess des Informationsflusses zu untersuchen, schlägt WEHLITZ [2000] einige relevante Fragestellungen vor, wie z. B. Generierung der Daten, Abhängigkeiten der Daten untereinander, Lebenszyklen, Reifegrade, etc. Auf dieser Basis lassen sich Informationsbausteine erarbeiten, die den In- und Output für eine Berechnung darstellen. Erster Schritt in diesem Prozess ist die detaillierte Analyse der Prozesskette Modellaufbau in der numerischen Simulation, um die benötigten Daten und Informationen für jeden der Schritte zu definieren. Das Solving läuft weitgehend automatisiert, die Auswertung im Postprocessing ist als Interpretation und Filterung der Simulationsergebnisse wichtig und bildet die Grundlage für die spätere Information für die Konstruktion bzw. den Versuch. Somit ist klar, dass die Qualität der Daten und Informationen für den Modellaufbau und die -änderung im Preprocessing für die Simulation von entscheidender Bedeutung sind, denn davon hängt die Qualität und Prognosegüte der Simulation ab. In Abbildung 4-8 ist die Prozesskette des Modellaufbaus der numerischen Simulation im Detail mit den wichtigen Zwischenschritten dargestellt.

³¹ Obwohl in den meisten kommerziellen CAD-Systemen möglich, werden zusätzliche Informationen für die weitere Prozesskette, wie z. B. Schwerpunkt des Teils, Masse, etc. noch nicht durchgängig im CAD-Modell gespeichert, was vermutlich damit zusammenhängt, dass die Informationen für die Konstrukteure selbst ohne Bedeutung sind. Durch die Konvertierung der Daten in die CAE-Systeme bzw. in neutrale Formate gehen viele dieser Informationen für die Berechnung verloren, lediglich STEP ist in der Lage, eine Vielzahl an Informationen zu erhalten [VGL. DYLA 2002].

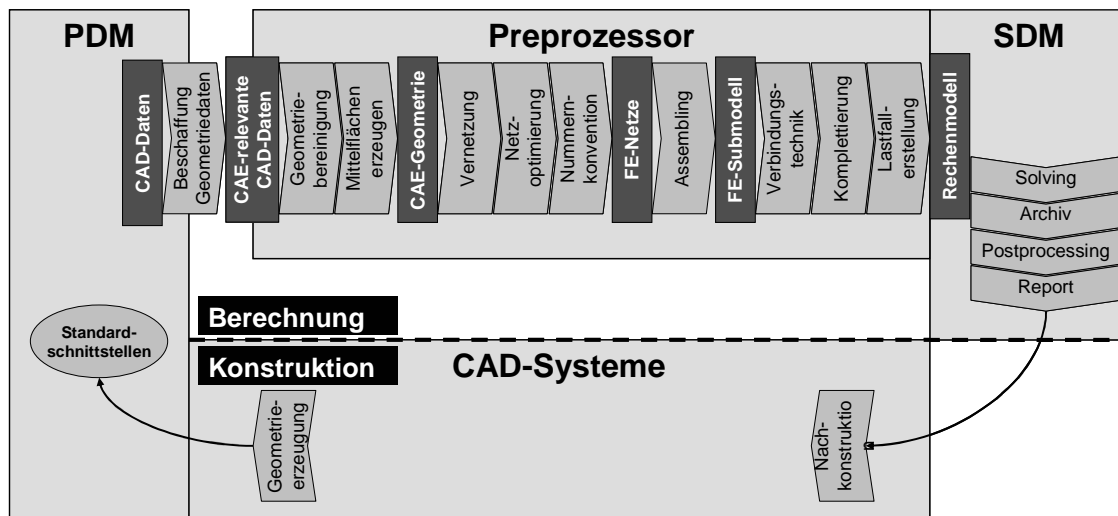


Abbildung 4-8: Prozesskette des Modellaufbaus in der numerischen Simulation

Die einzelnen Zwischenschritte, bei denen Daten und Informationen benötigt werden, werden im Folgenden beschrieben. Es sind all die Prozessschritte, bei denen keine Informationen einfließen, nicht berücksichtigt, beispielsweise Vernetzung, Netzoptimierung und Nummernkonvention, da diese Schritte rein berechnungsintern ablaufen und keinerlei Beziehungen zur Konstruktion besitzen.

- Zwischenstand „CAD-Daten“: die in PDM-Systemen abgelegten 3D-CAD-Daten in den verschiedenen nativen oder systemneutralen Formaten bilden die Basis für den Modellaufbau in der Simulation.
- Prozessschritt „Beschaffung Geometriedaten“: der Schritt ist insofern von essentieller Bedeutung, weil es gilt, den richtigen Konstruktionsstand des CAD-Modells bzw. der Geometrie für den Modellaufbau zu selektieren.
- Zwischenstand „CAE-relevante CAD-Daten“: die CAE-relevanten CAD-Daten stellen die Summe an CAD-Modellen dar, die für den Aufbau des lastfallspezifischen Rechenmodells nötig sind.
- Prozessschritt „Geometriebereinigung“: der auch als Aufbereitung, Vereinfachung, und Idealisierung der Geometrie oder Defeaturing bekannte Vorgang reduziert die Geometrie auf die für den Lastfall wesentliche Topologie. Dabei gilt es stets zu beachten, dass dadurch die Ergebnisse nicht verfälscht werden und falsche Randbedingungen angenommen werden. Der Berechner muss folglich wissen, was er vereinfachen kann und das geht nur im Dialog mit dem Konstrukteur.
- Prozessschritt „Verbindungstechnik“: mit dem Prozessschritt „Verbindungstechnik“ werden alle Interaktionen verstanden, die angebracht werden müssen, um die Teile bzw. Submodelle miteinander zu verbinden. Zu unterscheiden sind drei verschiedene

Interaktionsansätze [FORSEN ET AL 2002]: Kontaktdefinitionen, stoffschlüssige Verbindungstechnik und homogen-strukturmechanische Koppelstellen. Hier spielt eine große Rolle, welche Techniken umsetzbar sind und von der Konstruktion mitgetragen werden, d. h. die Festlegung kann nur im Dialog mit der Konstruktion erfolgen.

- Prozessschritt „Komplettierung“: das Modell wird komplettiert, indem letzte Nachbearbeitungen für die spätere Berechnung erfolgen und weitere Eigenschaften hinzugefügt werden. Besonders die Materialzuweisung und die Massenausstattung spielen hier eine signifikante Rolle.
- Prozessschritt „Lastfallerstellung“: die Lasten und Lagerungen werden mit dem Modell verbunden. Zum Einen sind das Standardkomponenten, wie die verschiedenen Dummies (Kopf, Hüfte, Beine, Knie, Ganzkörper etc.) und Barrieren (Wand, Straße, Pfahl etc.) für den Crash oder z. B. das Akustik-Fluid für NVH. Zum Anderen werden Kräfte, Krafteinleitungspunkte, Auswertepunkte, Auftreffwinkel und Anfangsgeschwindigkeiten je nach Lastfall hinzugefügt. Die Positionierung der Dummies ist ein Vorgang, der durchaus sehr aufwendig sein kann. Als Beispiel ist hier der Fußgänger- oder Insassenschutz zu nennen, der eine stochastische Verteilung der Kopfaufprallpunkte vorsieht [SANDFORT & KLEINE TRIMPE 2004]. Wichtig ist vor allem, dass die Berechnung die grundsätzlichen Anforderungen an das Produkt, in diesem Fall ein Fahrzeug kennt, um eine effiziente und zielgerichtete Auslegung machen zu können.

Aus den für eine Simulation als notwendig definierten Daten und Informationen lassen sich nun Informationsbausteine ableiten, die einen definierten Input und Output haben. In Abbildung 4-9 ist der Aufbau eines Informationsprozessbausteins dargestellt: bei den Produktdaten wird unterschieden zwischen Strukturinformationen und rein bauteilbezogenen Daten, wobei erstere für alle Bauteile gelten und somit übergeordneten Charakter haben.

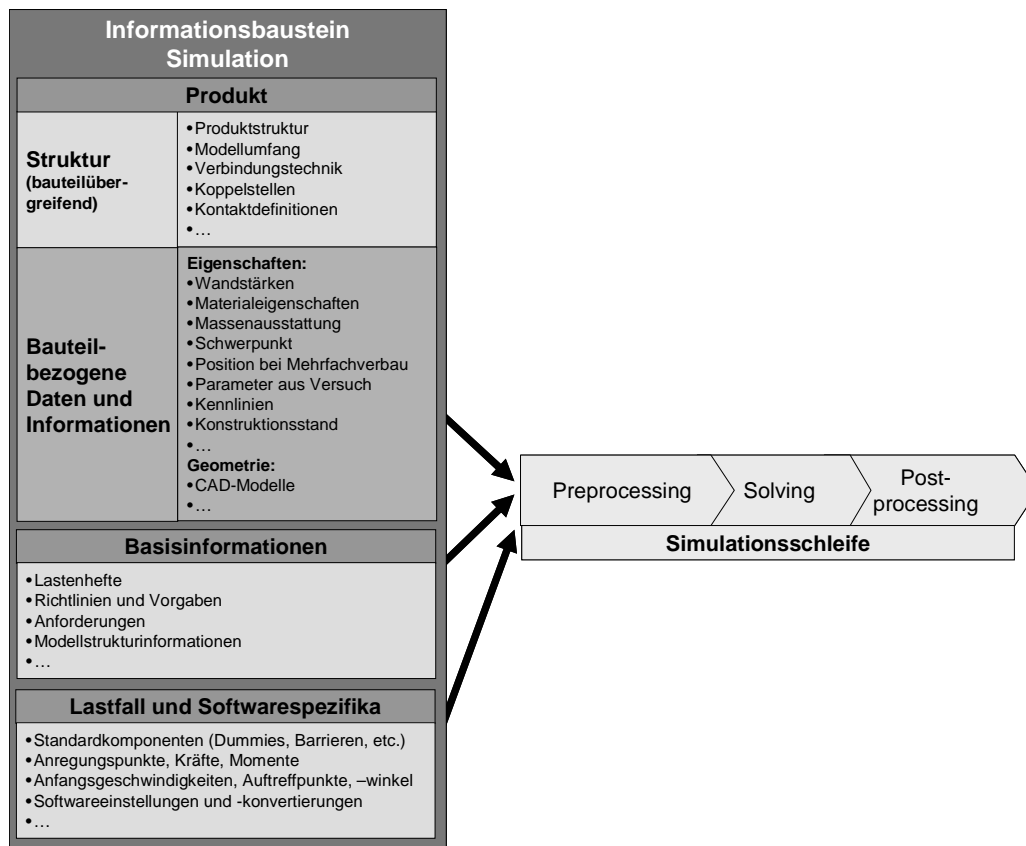


Abbildung 4-9: Informationsbausteine für die Simulation

Für die Simulation gibt es je nach Produkt eine Vielzahl solcher Bausteine, die derzeit untereinander nicht vernetzt sind und somit ungeordnet in die Simulation eingegeben werden. Vorteil der Bausteine ist die Ordnung und Sammlung der Daten und Informationen in sich, so dass sich für eine Simulationsdisziplin hier ein konsistentes Modell erstellen lässt. Problematisch wird es, wenn man die Vernetzung in der Simulation untereinander berücksichtigt, wie in Abbildung 4-4 ansatzweise für zwei Disziplinen dargestellt. Dazu kommt, dass sich die Bausteine untereinander nicht immer gleichen müssen für alle Disziplinen, besonders die bauteilbezogenen Informationen können variieren, weil nicht jede Disziplin z. B. die vollständige Geometrie benötigt. Eine Lösung muss daher in der Verknüpfung von Informationsbausteinen liegen und die Vernetzung von verschiedenen Informationen untereinander.

Informationsfluss von der Simulation in die Konstruktion

Auch wenn die Bedeutung der Simulation einmal im Sinne eines Entwicklungswerkzeuges und zum anderen im Sinne eines gleichberechtigten Prozesspartners, wie bereits mehrfach erwähnt, stark gestiegen ist, so gilt es doch festzuhalten, dass letztlich nur das im Produkt zu

finden ist, was vorher freigegeben³² wurde und z. B. in Form von Geometrieänderungen im CAD-Modell oder der Neudefinition von Verbindungstechniken im Produkt umgesetzt wurde. Gerade für mechanische Eigenschaften des Produkts spielen die geometrische Ausprägung, der verwendete Werkstoff, die gewählte Verbindungstechnik, etc. immer noch die entscheidende Rolle für die Funktion bzw. die Eigenschaften, so dass sich die von der Simulation initiierten Änderungen auch im Produkt wieder finden müssen, um wirksam zu sein. Der Rückführung von Berechnungsergebnissen in den Konstruktionsprozess kommt somit eine entscheidende Bedeutung zu für die funktionale Zielerreichung des Produktes, dazu kommt ein hohes Potential an eingesparten Änderungskosten in späten Phasen der Entwicklung. Da nach KLEEDÖRFER [1999] der Prozess des Änderungsmanagements u. a. deswegen oft Defizite aufweist, weil die Kommunikation und Zusammenarbeit trotz SE-Strukturen mangelhaft ist und es häufig an der schnittstellenübergreifenden Zusammenarbeit mangelt, kommt dem Informationsfluss von der Simulation in die Konstruktion ebenfalls eine zentrale Rolle im Informationsfluss in Unternehmen zu, wenngleich sich in der Literatur³³ wenig über das Problem finden lässt, vielmehr ist eher vage und allgemein von Informationsmanagement die Rede.

Diverse Vorschläge zur direkten Verbindung von CAE- zu CAD-Modellen wurden bereits in Kapitel 2.3.5 vorgestellt, so etwa die direkte Kopplung nach BOSHOFF [1997]. Diese Ansätze sind jedoch noch nicht flächendeckend umgesetzt und werden durch die heterogene Softwarelandschaft mit stetig wachsender Spezialsoftware mit nativen Datenformaten auch nicht begünstigt. Ein alternativer und pragmatischer Weg ist die Erzeugung von Geometriedaten aus geänderten FE-Netzen, die dann als IGES- oder VDAFS-Daten in die Konstruktion übertragen, und dort vom Konstrukteur nachkonstruiert werden können. Für einfache Bauteile, speziell aus dem Bereich der Volumenkonstruktion, liefern BURBLIES ET AL [2003] einen Ansatz, mit dem Bauteile aus der Topologieoptimierung geglättet werden können und dem Konstrukteur für schnelle Prototypenteile zur Verfügung gestellt werden können, die Nachkonstruktion ist trotzdem notwendig. Der Bruch am Anfang der CAD-CAE-Prozesskette, in dem aus CAD-Daten vereinfachte FE-Netze abgeleitet werden, lässt sich nicht mehr rückgängig machen, so dass eine hundertprozentige Übernahme der FE-Geometrie nicht mehr möglich ist [ADAMS 2006]. Der zweite Bruch ist am Ende der Prozesskette bei der Rückführung von Ergebnissen in die Konstruktion zu sehen, bei dem aus medialer Sicht der Informationsträger gewechselt wird, die CAx-Daten werden durch andere Kommunikationsmedien, siehe dazu Tabelle 3-1, ersetzt. Eine weitere Schwierigkeit für den Konstrukteur ist die heterogene Struktur in der Simulation, wie in Kapitel 2.1 bereits dargestellt. Komponenten-, Baugruppen und Gesamtfahrzeugeigenschaften beeinflussen sich gegenseitig und werden teilweise parallel und teilweise sequentiell bearbeitet. Die Komponenten des Konstrukteurs liefern einen Beitrag zu den

³² Wer in Person die Freigabe ausspricht bzw. durchführt ist aus der Literatur bzw. der DIN 6789 [1990] nicht zu entnehmen, dennoch unterstellen die meisten Autoren implizit der Konstruktion die Freigabeverantwortung, da sie das Optimum diversifizierter Anforderungen finden müssen [VGL. DÜCHTING 2005]. Dies macht insofern auch Sinn, als das CAD-Modell die Basis für die Folgeprozesse wie Fertigungsplanung, Werkzeugkonstruktion, etc. bildet.

³³ Vgl. FORSEN & HOFFMANN [2002], BURBLIES ET AL [2003].

Gesamtfahrzeugeigenschaften, wie z. B. Crash, sind aber selbst wiederum bestimmten Anforderungen unterworfen, z. B. Bauteilsteifigkeiten, Temperaturbeständigkeit, die zu erfüllen sind. Diese Simulationen laufen meist nicht parallel, wie in Abbildung 4-4 gezeigt, so dass die Ergebnisse zeitversetzt in die Konstruktion zurückfließen.

Aus dieser Analyse lässt sich der Informationsprozessbaustein für die Konstruktion ableiten, der zwar weniger Einzeldaten- und Informationen enthält, dafür in seiner zeitlichen Einordnung im Prozess mehr Schwierigkeiten bereitet. Für den Konstrukteur ist im Grunde nur die Beantwortung einer Frage aus der Simulation wichtig: welche Eigenschaften hat das Bauteil und was muss optimiert werden, um die Anforderungen zu erreichen. Für die Konstruktion gelten hier außer den funktionalen noch weitere Randbedingungen aus z. B. der Fertigung, die es zu berücksichtigen gilt, bevor die Vorschläge der Simulation umgesetzt werden können. In Abbildung 4-10 ist ein Informationsprozessbaustein für die Konstruktion dargestellt und es wird dabei auch die besondere Herausforderung für die Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Simulation deutlich: eine Synchronisierung der Prozesse, damit die Ergebnisse der Simulation strukturiert in die Konstruktion zurückfließen.

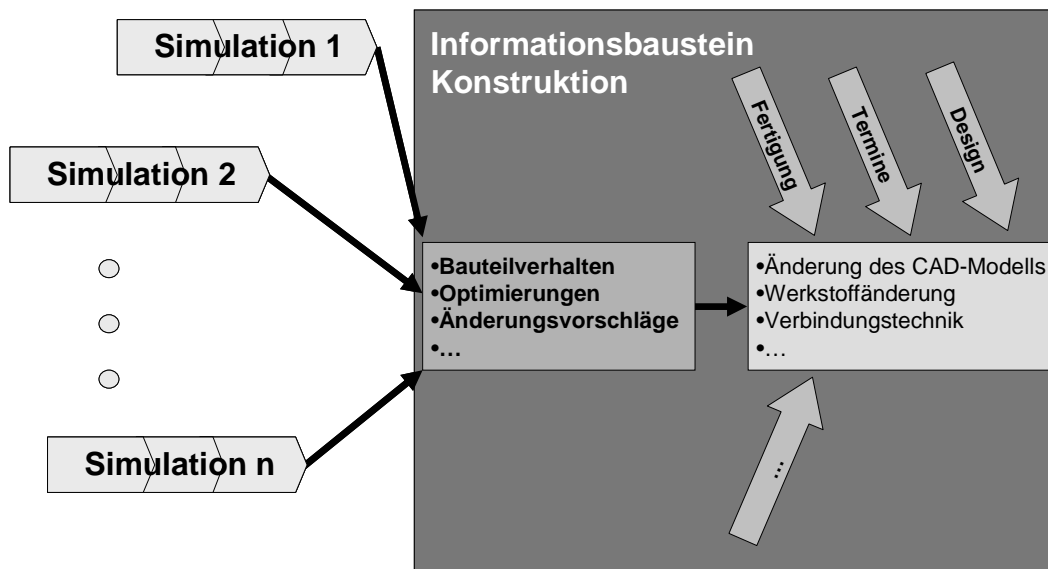


Abbildung 4-10: Informationsprozessbaustein für die Konstruktion

4.4 Zusammenfassung Kapitel 4

Im vierten Kapitel wurde die wichtige und zugleich kritische, weil schwer zu beeinflussende Rolle der Kommunikation im Entwicklungsprozess deutlich. Allein die Interpretation des Wortes Kommunikation ist sehr vielfältig, daher wurde im Kontext der Arbeit eine Einschränkung auf die zu übertragenden Daten und Informationen getroffen und die Beziehungsebene mit den menschlichen Einflüssen ausgeblendet. Es konnte gezeigt werden, dass trotz

eines hohen technischen Standes bzgl. der Kommunikationsmedien nach wie vor viele Probleme der Kommunikation ungelöst sind. Gerade bei Kommunikation in komplexen Strukturen kommen einige Faktoren hinzu, die den wechselseitigen Austausch von Daten und Informationen zwischen Konstruktion und Simulation erschweren, Anzahl der beteiligten Menschen, die Organisationsstrukturen und der Formalisierungsgrad.

Dazu sind neue Ansätze notwendig, u. a. die Formalisierung von Informationen. Dazu wurde der Prozess des Daten- und Informationsaustausches analysiert und für die wichtigsten Informationen für die Konstruktion und die Simulation Informationsbausteine definiert.

5. Verknüpfung von Komponenten und funktionalen Eigenschaften

Eine Kommunikationsunterstützung im Prozess zwischen Konstruktion und Simulation muss den Anforderungen der Ingenieure an eine zielgerichtete Versorgung mit Daten und Informationen in einem komplexen Umfeld Rechnung tragen, wie sie in Kapitel 4.2 formuliert wurden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Sichten von Konstruktion und Berechnung auf das Produkt sehr unterschiedlich sind und wie in Kapitel 4 gezeigt die Inhalte der Informationen und Daten in den Informationsbausteinen dem entsprechen.

Überlagert wird dies durch die fehlende Strukturierung des Daten- und Informationsaustausches, der in komplexen Netzwerken, wie in der funktionalen Auslegung eines Fahrzeugs, eher zufälligen denn geregelten und systematischen Charakter annimmt. Notwendig sind daher die Strukturierung des Produktes und der Funktionen und funktionalen Eigenschaften und vor allem deren Verknüpfung untereinander, was dann die Basis bilden kann für eine weitere Verwendung im Iterationsprozess zwischen Konstruktion und Simulation.

Im folgenden Kapitel wird die Strukturierung von Produkten und Funktionen bzw. funktionalen Eigenschaften prinzipiell erläutert, die verwendete Methode der Einfluss- und Verträglichkeitsmatrix vorgestellt und auf dieser Basis schließlich die Verknüpfung von Komponenten und Eigenschaften in der Bauteil-Lastfall-Matrix hergeleitet.

5.1 Strukturierung von Produkten, Funktionen und funktionalen Eigenschaften

Die Optimierung von komplexen Produkten kann nur durch die Zerlegung und Strukturierung erfolgen, indem das Produkt in Subsysteme, die Subsysteme in Komponenten und die Komponenten in Einzelteile zerlegt werden. Dadurch können Zusammenhänge zwischen Komponenten auf einer niedrigeren hierarchischen Ebene erkannt und optimiert werden und diese Informationen dann wieder auf höhere Ebenen der Produktstruktur transferiert werden [KOKKOLARAS ET AL 2004]. Der Produktstrukturierung stehen die funktionalen Eigenschaften gegenüber: mit steigender Produktkomplexität steigt die Anzahl der Designvariablen ebenfalls an und eine gezielte multidisziplinäre Optimierung in der Simulation wird wegen der Vielzahl an Eigenschaften schwieriger [NYSTRÖM ET AL 2003]. Um die Komplexität des Produktes, die im Folgenden zu definieren sein wird, zu beherrschen, ist die Strukturierung von Produkten und die Abbildung von funktionalen Eigenschaften notwendig. Eine Strukturierung von Eigenschaften ist bedeutend schwieriger und erst recht die Verknüpfung verschiedenster Strukturierungen. Im folgenden Kapitel werden nach der Definition von Komplexität die Möglichkeiten einer Strukturierung von Produkten und funktionalen Eigenschaften vorgestellt und die Möglichkeiten einer Verknüpfung diskutiert.

5.1.1 Produktkomplexität und systematische Strukturierung

Definition der Komplexität

Die überragende Rolle der Komplexität heutiger Produkte und als deren Konsequenz die Komplexität der Produktenstehungsprozesse wurde bereits mehrfach erwähnt und findet sich auch in der aktuellen Forschungsliteratur so wieder³⁴. KEIJZER ET AL [2006] sehen in der zunehmenden Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten einen Grund für die Zunahme der Produktkomplexität. Die gesellschaftlichen Ursachen dafür zu erforschen bleibt Gegenstand anderer Disziplinen. Der Ingenieur muss der zunehmenden Komplexität begegnen und dafür gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Strategien: die eine ist, die Komplexität zu reduzieren, wie vielfach vorgeschlagen wird. Dies kann geschehen, indem man Varianten reduziert, was wiederum kontraproduktiv ist, wenn damit Kundenwünsche vernachlässigt werden. Die andere Strategie bedeutet, die Komplexität zu beherrschen, d. h. Methoden zu nutzen und zu entwickeln, die dem Entwickler erlauben, strukturiert vorzugehen. Da die Komplexität nach DANILOVIC [1999] zu einem erheblichen Teil von der Technologie erzeugt wird und diese durch Forschung und Technik eher anspruchsvoller denn einfacher wird, bleibt nur der Weg, die Komplexität zu bewältigen und zu managen³⁵. MALIK [2003] unterscheidet hier zwischen dem analytisch-reduktionistischen und dem systemisch-interaktionistischen Ansatz. Für die Problematik der Integration von Konstruktion und Simulation gibt es nur eine Möglichkeit, nämlich die Komplexität zu beherrschen. Dies liegt daran, dass die Anforderungen an die Produkte, z. B. im Fahrzeugbau in Abbildung 1-5 ausschnittsweise gezeigt, weiter steigen und die Anzahl der Bauteile, die diese Anforderungen erfüllen müssen, mindestens stabil bleibt, jedoch stärker vernetzt zur Erfüllung von Funktionen beitragen müssen. Die Definitionen für Komplexität sind äußerst vielfältig, daher wird im Folgenden versucht, eine Eingrenzung im Sinne der vorliegenden Arbeit vorzunehmen und die jeweiligen Definitionen gleich auf die Problemstellung der Arbeit anzupassen.

MALIK [2003] versteht unter dem Begriff Komplexität die Tatsache, dass ein System ungeheuer viele Zustände aufweisen kann. Die Ursache für die Komplexität liegt im Wesentlichen in der Interaktion von Elementen. Übertragen auf die Integration von Konstruktion und Simulation bedeutet das, dass sich die funktionalen Eigenschaften im Entwicklungsprozess abhängig voneinander im Laufe des Entwicklungsprozesses ständig ändern und sich der Zustand des Systems, in diesem Falle des Fahrzeugs, ständig verändert, dies entspricht in etwa dem wachsenden Reifegrad eines Produktes in der Entwicklung. Für PULM [2004] bedeutet Komplexität, dass aufgrund bestimmter Beschränkungen nicht mehr alle Elemente mit allen anderen verknüpft werden können und die Gesamtheit somit nicht mehr kontrolliert werden kann.

³⁴ Eine Folge der Produktkomplexität ist, dass alle Prozesse, die den Life-Cycle des Produktes betreffen, Entwicklung, Produktion, Qualitätssicherung, Vertrieb, etc. ebenfalls komplex werden, ein Postulat, das der Autor nicht beweisen kann, sondern auf eigene Erfahrung gründet.

³⁵ Nach DANILOVIC [1999] besteht ein erheblicher Zusammenhang zwischen Produkt-, Technologie- und Organisationskomplexität (das eine bedingt das andere). Dies lässt sich auch in der Fahrzeugentwicklung für die Integration von Konstruktion und Simulation feststellen.

In der Produktentwicklung sind nicht alle Bauteile mit allen Funktionen bzw. Eigenschaften verknüpft, da nur eine bestimmte Gruppe von Teilen zur Erfüllung von bestimmten Funktionen bzw. Eigenschaften beiträgt, was aber meist nicht über das gesamte Produkt, sondern nur für Subsysteme bekannt ist. Die besondere Herausforderung besteht somit darin, diese Subsysteme in das Gesamtsystem zu integrieren und die Verknüpfungen zwischen den Elementen transparent zu machen³⁶. Eine sehr griffige und auch praxistaugliche Definition von Komplexität liefert STEINMEIER [1998], indem er Komplexität aufteilt in Varietät und Konnektivität, siehe dazu Abbildung 5-1. Die Varietät ist dabei die Elementvielfalt, die Konnektivität die Beziehungsvielfalt. Reale Systeme lassen sich damit gut beschreiben, was ihre Verknüpfungen untereinander betrifft. Das Problem der Definition nach STEINMEIER [1998] bleibt, dass Systemzustände³⁷ und vor allem deren Änderungshistorie nur unzureichend repräsentiert sind. Auf die Integration von Konstruktion und Simulation übertragen bedeutet das, dass die Vernetzung der beiden Systeme Konstruktion und Simulation statisch, also zu einem definierten Zeitpunkt im Prozess, dargestellt werden kann, die Zustände des Systems jedoch nicht ausreichend erfasst werden können.

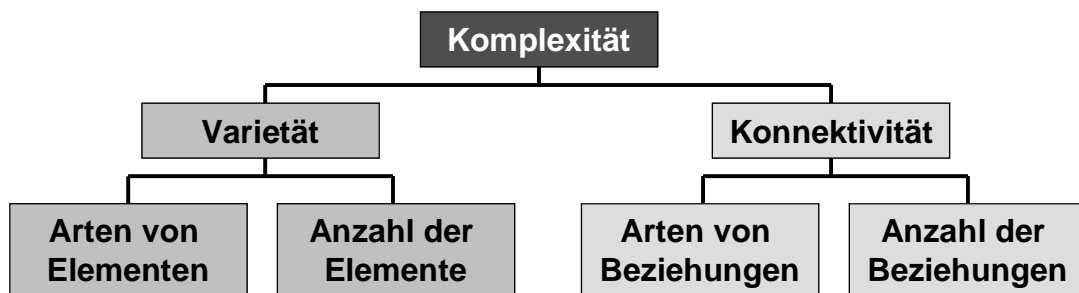


Abbildung 5-1: Komplexität von Systemen [STEINMEIER 1998]

Eine Erweiterung der Definition von Komplexität nach STEINMEIER [1998] stellt die Definition von DÜCHTING [2005] dar, die in Abbildung 5-2 gezeigt ist. Unterschieden wird nach technischer Komplexität, womit vorwiegend die Produktkomplexität gemeint ist, und nach organisatorischer Komplexität. Für die technische Komplexität spielen die Zahl der Elemente und der Charakter ihrer Beziehungen zueinander eine große Rolle. Übertragen auf die Prob-

³⁶ Dabei sei angemerkt, dass in realen Produkten aus Sicht des Autors auch das Fehlen einer Verknüpfung eine Information darstellt, die für den Entwickler wichtig ist, da sie damit Handlungsspielräume beschreibt.

³⁷ Die Zustände eines Systems sind wesentlich für die Beschreibung eines Systems, sie können nach WENDT [1998] diskrete oder kontinuierliche Zustände sein. Das vorliegende System Konstruktion und Simulation ist streng genommen ein kontinuierliches System. Gespiegelt am Entwicklungsprozess ist allerdings zulässig, das System als diskret zu bezeichnen, da die für den Entwickler sichtbaren Systemzustände nur zu definierten Zeitpunkten im Entwicklungsprozess sichtbar werden. Gleichwohl wäre es eine interessante Fragestellung, auch vor dem Hintergrund des Änderungs- bzw. Reifegradmanagements, den zeitlichen Verlauf transparent zu machen, um auf diese Weise Zustandsänderungen nachvollziehen zu können.

lematik der Integration von Konstruktion und Simulation bedeutet das hinsichtlich des Produktes die Zahl an Komponenten und hinsichtlich der Funktionen und funktionalen Eigenschaften die Fülle der Anforderungen an das Produkt, die mit der numerischen Simulation ausgelegt werden. Darüber hinaus ist wichtig, wie die Elemente der Produktstruktur und die Funktionen bzw. Eigenschaften jeweils untereinander in Beziehung stehen, d. h. wie sind die wechselseitigen Abhängigkeiten. Dies können beispielsweise die Charakterisierung von Komponentenverbindungen sein, formschlüssig oder stoffschlüssig, oder die geometrische Zuordnung von Komponenten zueinander. Für die Simulation können Beziehungen zwischen Funktionen z. B. in der Form auftreten, dass eine Funktion für die andere benötigt wird, eine Funktion die andere verursacht oder sich gegenseitig aufheben [LINDEMANN 2004B]. Organisatorische Komplexität äußert sich in der Zahl der Beziehungen und der zeitlichen Veränderung, der die Elemente und deren Relationen unterworfen sind. Die dynamische Komplexität ist gerade für die Integration von Konstruktion und Simulation besonders relevant: während in der Konzeptphase noch wenige Komponenten und die vermeintlich zentralen Anforderungen betrachtet werden und in ein stimmiges Gesamtfahrzeugpackage überführt werden müssen, das Wissen jedoch mit einer hohen Unschärfe belegt ist, wie bereits gezeigt wurde, steigt in der Serienentwicklung die Zahl der Komponenten und Anforderungen, während gleichzeitig die Freiräume relativ klein werden und die Änderungsmöglichkeiten, jedenfalls zu vertretbaren Kosten, sinken [VOLZ ET AL 2006]. Besondere Schwierigkeiten bereiten nach DÜCHTING [2005] die Anzahl der Beziehungen: die Zahl der Elemente, seien es Komponenten oder Eigenschaften, lassen sich noch relativ leicht ermitteln, während die Zahl der Beziehungen größere Schwierigkeiten bereitet.

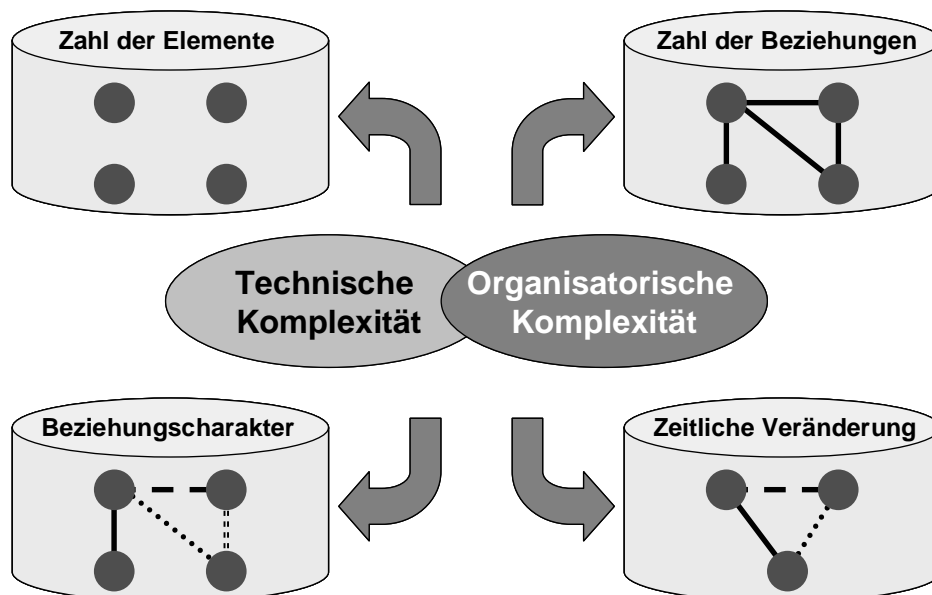


Abbildung 5-2: Komplexität in der Entwicklung nach DÜCHTING [2005]

Für die Arbeit spielen somit die technische Komplexität innerhalb eines Produktes in Form der Komponenten und Eigenschaften die zentrale Rolle. Die Komponenten sind beschrieben durch ihre Anzahl, ihre Relationen zueinander und ihre zeitlichen Abhängigkeit, die sich in der Änderung der Komponenten an sich sowie der Änderung in der Produktstruktur manifestiert. Die Eigenschaften sind ebenfalls durch ihre Anzahl und ihre Abhängigkeit voneinander beschrieben, in einem ersten Schritt werden die Anforderungen und damit die Eigenschaften als konstant beschrieben. Weiterhin sind die wechselseitigen Relationen von Komponenten und Funktionen Ursache und Gegenstand der Komplexität in der Integration von Konstruktion und Simulation.

Systematische Strukturierung

Um die wie auch immer geartete Komplexität zu beherrschen, ist eine systematische Strukturierung eines Systems notwendig. Der Komplexitätsbegriff ist eng mit der Systemtheorie verbunden, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird³⁸. Für die Strukturierung eines Systems werden die Elemente (Teile/Komponenten) erfasst, abstrahiert und in ihren Beziehungen zueinander dargestellt [DAENZER & HUBER 2002]. Die Elemente des Systems können wiederum ihrerseits als System verstanden werden, je nachdem, wie das Abstraktionsniveau gewählt wird. Die Systemgrenze bildet die mehr oder weniger willkürliche Abgrenzung zum Umfeld eines Systems. Das entstehende Gefüge des Systems bildet die Struktur, die dann natürlich auch verändert und neu strukturiert werden kann, um das System zu optimieren. In Abbildung 5-3 ist schematisch ein Produkt mit seinen Elementen dargestellt, die untereinander in Beziehung stehen. Die Bestandteile des Systems in Form von Komponenten, Eigenschaften und Funktionen sind ja nach Betrachtungsweise unterschiedlich angeordnet, daher die verschiedenen Sichten auf das Produkt. Neben den in Abbildung 5-3 dargestellten Sichten Geometrie, Funktion und Fertigung gibt es noch eine Vielzahl anderer, die in ihrer Vollständigkeit dann ein Produktmodell ergeben, vgl. dazu Kapitel 2.2.3.

³⁸ Für eine ausführliche Darstellung der Systemtheorie sei an dieser Stelle auf die Arbeit von PULM [2004] verwiesen.

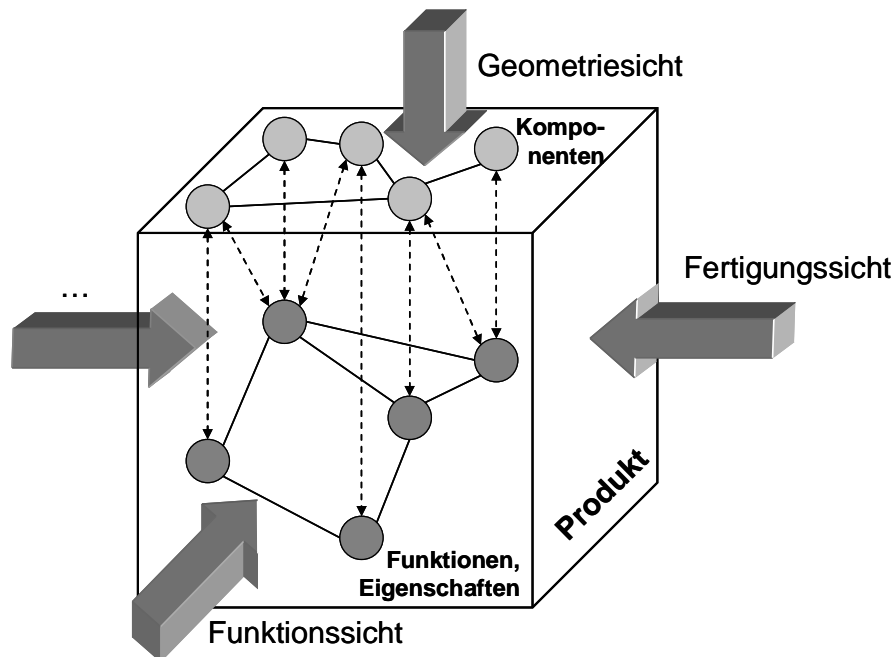


Abbildung 5-3: Verschiedene Produktsichten zur Systemerfassung

Eine besondere Schwierigkeit bei der Erfassung von Systemen ist die Festlegung der Systemgrenze. Nach FUCHS [2006] existiert bei der Erfassung der Systemgrenze eine optimale Komplexität, d. h. eine zu enge Systemgrenze wird dem System genauso wenig gerecht wie eine zu großzügige Auslegung. Dies ist sehr wichtig für die Integration von Konstruktion und Simulation, da eine Definition der Systemgrenze den Lösungsraum bzw. die gewählten Ansätze bestimmt. Vor allem gilt es hier zu beachten, dass der Lösungsraum mehr Dimensionen berücksichtigen muss und verschiedene Sichten auf das Produkt aggregiert.

Mit dem Blick auf die Abbildung 5-3 wird jedoch klar, dass eine Integration von Konstruktion und Simulation für komplexe Produkte nicht nur alle fünf Dimensionen der Integration, wie in Kapitel 3.2 eingeführt, berücksichtigen muss, sondern sich auch intensiv mit der Struktur von Produkten und Funktionen sowie deren Eigenschaften auseinandersetzen muss. Das Produkt hat je nach Sicht eine andere Struktur. Übertragen auf das gewählte Produktbeispiel Automobil hat beispielsweise die Fertigung eine andere Sichtweise als die Entwicklung. Die Fertigung denkt in Werkzeugherstellzeiten, Montagetakten, etc. und strukturiert das Fahrzeug entsprechend der Aufbaufolgen. Für die Entwicklung, die wie in Kapitel 2.1, erläutert, eine sehr integrative Rolle innehat, dennoch aber auch eigenen Zielen unterliegt, sieht eine Produktstruktur anders aus. Außerdem kommt noch die zeitliche Komponente hinzu, in Abbildung 5-3 als Entwicklungsprozess dargestellt, was bedeutet, dass die Struktur zeitlich variabel und immer nur eine Momentaufnahme der aktuellen Situation zum Zeitpunkt t_n ist, zum Zeitpunkt t_{n+1} ist der Zustand nicht mehr gültig, Relationen und Elementzustände haben sich bereits wieder verändert (vgl. Kapitel 2.3.1.1.7). Es gilt daher, die Struktur der Geomet-

rie, meist als Produktstruktur bezeichnet und die Funktionen und die Eigenschaften zu modellieren und geeignete Methoden zu finden, um sie miteinander zu verknüpfen.

5.1.2 Modellierung von Produktstrukturen

Nach GÖTZ & MAIER [2006] können Produktstrukturen baugruppen-, funktions- und merkmalsorientiert sein. Eine weitere Möglichkeit ist nach [CONRAD 2005] die Strukturierung von Produkten³⁹ nach funktions- oder fertigungs- und montageorientierten Gesichtspunkten, je nach Sichtweise auf das Produkt, wie oben bereits erläutert. Für die PKW-Entwicklung und für die Konstruktion und Simulation von hoher Relevanz sind die baugruppen- und funktionsorientierte⁴⁰, die im Folgenden näher betrachtet werden. Elemente der Produktstruktur sind die einzelnen Komponenten, die Zuordnung der Elemente untereinander erfolgt nach bestimmten Kriterien oder Merkmalen [RAPP 1999]. Strukturiert man ein Produkt rein nach Baugruppen, so ist das Ergebnis eine hierarchische Anordnung von über- und untergeordneten Baugruppen und auf der untersten Hierarchieebene die einzelnen Bauteile. Bei der Strukturierung des Produktes nach Funktionen werden Komponenten zu funktionalen Einheiten zusammengefasst, die bestimmte Funktionen erfüllen müssen, Kühlluft leiten, Kühlwasser kühlen, etc. am Beispiel einer PKW-Frontendentwicklung [EVERSHEIM 2002]. Beide Strukturierungsmethoden werden komplexen Systemen nicht vollständig gerecht und sind auch schwer umzusetzen. Gerade bei der PKW-Entwicklung ist eine reine Trennung nach Bauräumen nicht immer sinnvoll, da z. B. der Rohbau einerseits eine funktionale Einheit, sozusagen das Skelett des Fahrzeugs darstellt, das als zentrale Baugruppe für die wesentlichen Fahrzeugeigenschaften verantwortlich ist [LISCHKE & WILDE 2004], andererseits aber über das gesamte Fahrzeug verteilt ist und keinem spezifischen Bauraum allein zugeordnet werden kann. Der zweite Grund sind die zunehmenden Plattformstrategien und Modularisierungstendenzen in der Fahrzeugentwicklung, die klar definierte funktionale Schnittstellen voraussetzen [SEKOLEC 2005]. Resultat einer Produktstruktur wird deswegen immer eine Mischung aus baugruppen- und funktionsorientiertem Aufbau sein, das Ergebnis ist in Abbildung 5-4 in Anlehnung an ZEUGTRÄGER [1997] dargestellt. Das Gesamtprodukt ist auf der obersten Hierarchieebene, darunter sind funktionale Einheiten gebildet, im Falle eines Fahrzeugs könnten das beispielsweise Karosserie, Aggregate, Fahrwerk und Elektrik/Elektronik sein, darunter sind die Funktionsgruppen in Teilsysteme eingeteilt, für eine Karosserie beispielsweise Innenausstattung, Rohkarosserie, Türen und Klappen, etc. So lässt sich die Struktur bis auf die Ebene der Bauteile verfeinern und es wird deutlich, wie wichtig eine Strukturierung des Produktes ist. Gäbe es diese Strukturierung nicht und damit die Zuordnung von Bauteilen zu Substrukturen, so wäre die Übersichtlichkeit nicht mehr gegeben. EVERSHEIM [2002] weist explizit auf die Bedeutung des Produktstrukturplans (=Produktstruktur) für die Folgeprozesse, insbesondere für

³⁹ CONRAD [2005] spricht in diesem Zusammenhang von Erzeugnissen, im Kontext der Arbeit sei weiterhin der Begriff Produkt gebraucht.

⁴⁰ Implizit ist die fertigungs- und montageorientierte Strukturierung in der baugruppenorientierten enthalten, meist bilden funktionale Einheiten auch Subsysteme für die Fertigung, beispielsweise Module eines Fahrzeugs, wie Sitze, Aggregate, etc.

den Projektstrukturplan hin, da die technischen Schnittstellen erheblichen Einfluss auf den Abstimmungsprozess in der Entwicklung und damit die organisatorischen Schnittstellen haben.

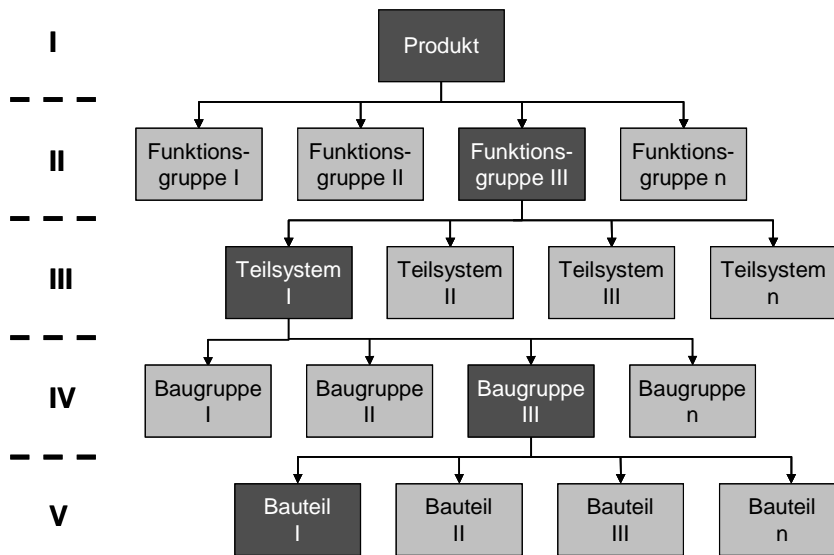


Abbildung 5-4: Hierarchische Produktstruktur nach ZEUGTRÄGER [1997]

In der Produktstrukturdefinition nach DIN 6789 [1990] sind zwei Aspekte enthalten: die Fertigung und die Funktion. Produkte werden in mehreren Zusammenbaustufen⁴¹ gefertigt und schließlich zum Gesamtprodukt zusammengesetzt. In der Automobilindustrie, in der die interne Wertschöpfung weiter sinken wird und im Jahr 2015 pro Durchschnittsfahrzeug nur noch 23% betragen wird [KALMBACH & KEINHANS 2004], sind Zusammenbaustufen unabdingbar, so dass die Produktstruktur dem auch Rechnung tragen muss. Nach der DIN 6789 [1990] entspricht die fertigungstechnische Gliederung aber nicht immer der funktionalen, so dass es neben der fertigungsorientierten auch die funktionale Produktstruktur gibt. Es existiert somit eine Vielzahl an Möglichkeiten, das Produkt sinnvoll zu strukturieren, abhängig ist dies von der gewählten Systemgrenze und von den unterschiedlichen Sichten auf das Produkt, wie in Abbildung 5-3 dargestellt. Die Produktstruktur eines Konstrukteurs sieht anders aus als die eines Berechnungsingenieurs. Je nachdem, welche Perspektive zum Produkt eingenommen

⁴¹ Für die Fahrzeugindustrie sind diese Zusammenbaustufen dann meist Komponenten von Systemlieferanten, z.B. Sitze, Fahrwerksteile und Aggregate, bei denen die Wertschöpfungsanteile beim Lieferanten zwischen 50 und 84% liegen [VDA 2006B]. Ausnahme bildet hier die Karosseriestruktur, bei denen der Eigenanteil der OEM bei 96% liegt [VDA 2006B], das unterstreicht auch die Bedeutung der eigenschaftsorientierten Auslegung in der Karosserieentwicklung. Der Anteil wird zwar nach einer Prognose des VDA [2006B] bis 2015 auf 59% sinken, dennoch kommt der Fahrzeugkarosserie und ihrer Prozesskette damit eine enorme Bedeutung bzgl. Kosten und Know-How bei den OEM zu.

wird, sehen die Komponenten in ihrer Anordnung anders aus. Vor allem die Relationen zwischen den Komponenten aber verändern sich abhängig von der Produktsicht.

Der Konstrukteur gliedert das Produkt stärker nach Baugruppen, da er eine geometrie- und bauteilbezogene Sicht auf das Produkt hat. Die Arbeitsschwerpunkte eines Berechners sind die Funktionen und Eigenschaften des Produkts, daher wird er sie stärker in den Vordergrund stellen und eine eher funktionsorientierte Sicht auf das Produkt einnehmen. Tatsächlich aber ist eine Verknüpfung beider Sichten für eine Integration notwendig. Gleichzeitig darf nicht übersehen werden, dass einer Strukturierung Grenzen gesetzt sind, da nicht alle Sichten auf das Produkt in einer Struktur vereint werden können. Dies gilt umso mehr, als bei einer Fahrzeugentwicklung, in der die Produktstruktur meist sechs Ebenen oder mehr besitzt und die Anzahl der Einzelteile mehr als 30.000 Stück beträgt [HELLMUTH 1997], die Zusammenhänge so komplex werden, dass es nach aktuellem Stand der Technik unmöglich ist, alles in einer Struktur zu vereinigen. In Abbildung 5-5 ist eine modulare Fahrzeugstruktur nach SIEPKER [2006] dargestellt, die dann gleichzeitig die Basis bildet für die weiteren Betrachtungen zur Integration von Konstruktion und Simulation im Rahmen der Arbeit. Die modulare Produktstruktur ist auch insofern für die Integration von Konstruktion und Simulation von Bedeutung, weil sie die Sicht der Konstruktion auf das Produkt weitgehend repräsentiert und dementsprechend eine Sicht auf das Produkt, die des Konstrukteurs, definiert. Sie legt implizit Zuständigkeiten fest und Organisationen sind ebenfalls meist nach ihr ausgerichtet.

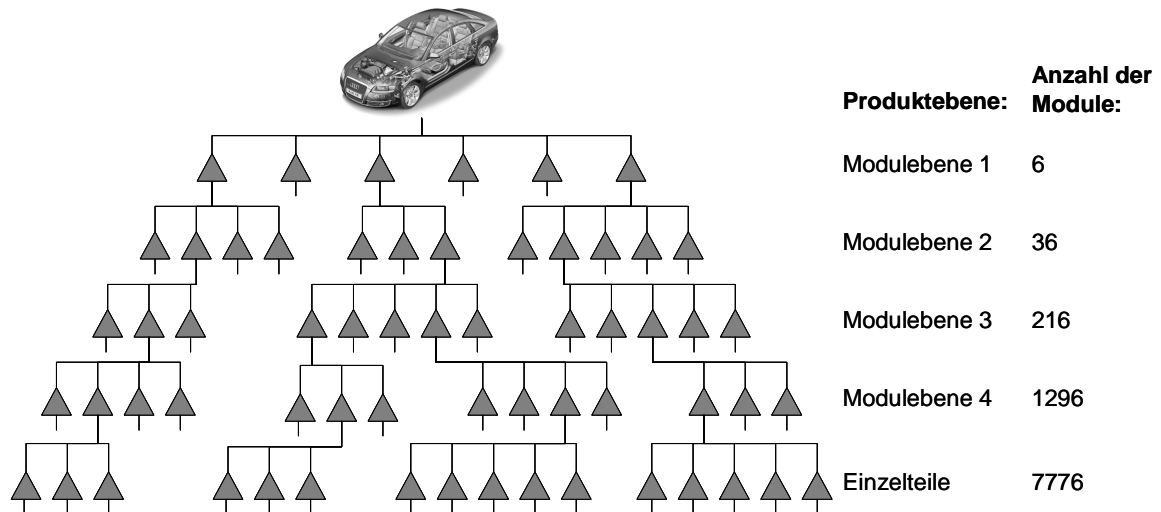


Abbildung 5-5: Hierarchie der modularen Produktstruktur in der PKW-Entwicklung [SIEPKER 2006]

5.1.3 Funktions- und Eigenschaftsstruktur eines Produktes

Es wurde dargestellt, dass sich die Modellierung von Produktstrukturen u. a. an Funktionen ausrichten lässt, was sofort die Frage aufwirft, wie die Funktionen und funktionalen Eigenschaften selbst modelliert werden. Wie sieht eine Produktrepräsentation aus Sicht der funktio-

nalen Anforderungen aus und welche Strukturierungsmethoden für Funktionen gibt es, zumal an dieser Stelle die Funktionen und Eigenschaften, die mit der numerischen Simulation abgedeckt werden, von besonderem Interesse sind. Wie in Kapitel 1.1.1 gezeigt wurde, hängen Funktionen und Eigenschaften eines Produktes zusammen. Die Eigenschaften bestimmen die Funktion und legen darüber hinaus viele weitere Ausprägungen des Produktes fest, wie z. B. die Geometrie. Bei der Strukturierung funktionaler Eigenschaften ist ein Vorgehen analog der Strukturierung von Funktionen zumindest partiell zulässig, da ähnlich wie bei den Funktionen Subsysteme definiert werden können, die über bestimmte Eigenschaften verfügen, die dann wiederum auf der nächsten Ebene aggregiert werden.

Funktionen können nach PAHL & BEITZ [2003] hierarchisch modelliert werden, die Gesamtfunktion setzt sich somit aus den Teilfunktionen der Subsysteme zusammen und das Resultat ist die Funktionsstruktur, wie sie in Abbildung 5-6 dargestellt ist. Diese Subsysteme haben Eigenschaften, die dann auf der obersten Ebene die Eigenschaften des Gesamtproduktes bilden. Die Summe aller Eigenschaften auf der nächst höheren Ebene muss aber nicht zwangsläufig das Optimum sein, Funktionen und Eigenschaften können sich widersprechen, sich aufheben und verstärken. STEINMEIER [1999] weist darauf hin, dass Funktionen stets Folgefunktionen nach sich ziehen, d. h. es Wechselwirkungen zwischen den Funktionen gibt. Dadurch ergeben sich Kausalitäten zwischen Funktionen, die es zu beachten gilt. Funktionen haben üblicherweise bei ihrer Definition zu Beginn einer Entwicklung ein sehr hohes Abstraktionsniveau, um den möglichen technischen Lösungsraum offen zu gestalten, das dann aber über Konzept, Vorentwurf, Entwurf und Detaillierung immer weiter abnimmt [EISEHUT 1999]. Werden die Funktionen dann in technische Lösungen umgesetzt, dann können die Eigenschaften des Gesamtsystems und der Subsysteme ermittelt werden.

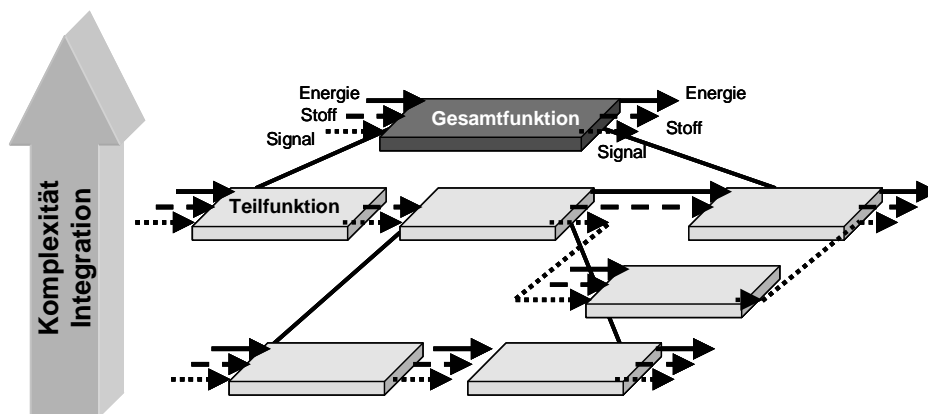


Abbildung 5-6: Funktionsstruktur durch Bildung von Teilfunktionen nach PAHL & BEITZ [2003]

Für die Strukturierung von Eigenschaften liefert HUBKA [1984] eine ausführliche Kategorisierung. Aus dieser Einteilung wird der für die Problematik der Integration von Konstruktion und Simulation am sinnvollsten erscheinende herausgegriffen, die Klassifizierung von Eigen-

schaften nach technisch-wissenschaftlichen Gebieten. Nach HUBKA [1984] gibt es darin folgende Eigenschaftskategorien für Maschinensysteme:

- Geometrie: Breite, Höhe, Gestalt, etc,
- Kinematik: Geschwindigkeit, Beschleunigung
- Mechanik: Festigkeit, Elastizität, etc.
- Thermodynamik: Erwärmung, Wärmeleitung, etc.
- Elektrik/Magnetismus: Kapazität, Spannung, Widerstand, etc.
- Optik: Brennweite, Brechung, etc.
- Akustik: Absorptionsfähigkeit, Tonfrequenz, etc.
- Chemie: Aggressivität, Korrosion, Affinität, etc.

Besonders die Eigenschaftsklassen der Kinematik, Mechanik, Thermodynamik, Elektrik und Akustik sind für die Simulation in der Fahrzeugentwicklung wichtig, denn sie sind Bearbeitungsschwerpunkt in der numerischen Simulation. Für die Strukturierung von allgemeinen Produkteigenschaften im Sinne der oben genannten Kategorien gibt es verschiedene Ansätze, der einfachste ist die Erfassung⁴² der Eigenschaften in Listenform [STEINMEIER 1998]. Für die Simulation ist das aber bei weitem nicht ausreichend, denn die Beziehungen zwischen den Eigenschaften werden nicht abgebildet und Widersprüche bzw. Inkonsistenzen können nicht entdeckt werden. HUBKA [1984] schlägt eine Methode vor, in der Eigenschaften mittels Bool-scher Logik in bestimmte Kategorien eingeordnet werden (Zugehörigkeit „Ja“ oder „Nein“). In einem zweiten Schritt lassen sich die Eigenschaften untereinander in Matrixform anordnen und auf ihre Verträglichkeit prüfen. Dies kann sowohl zwischen Eigenschaften einer Klasse als auch zwischen Eigenschaften verschiedener Klassen geschehen. STEINMEIER [1999] zeigt die Grundproblematik der Eigenschaften von komplexen Systemen auf, nämlich dass sich Systemeigenschaften meist nicht eindeutig zuordnen lassen und häufig über die Systemgrenze hinaus wirken. Viele Eigenschaften, wie z. B. Fahrgeräusche, Crashesicherheit und Fahrzeugsteifigkeit, wirken durch das Zusammenspiel vieler Komponenten und lassen sich nicht einer einzelnen Komponente zuordnen. PATZAK [1982] stellt dazu fest, dass ein System als Ganzes wesentliche Eigenschaften besitzt, die bei keiner der im System enthaltenen Komponenten bzw. Subsysteme als solche allein auftreten. Dies gilt sicher für einen Teil der Eigenschaften, ein sehr großer Teil der funktionalen Eigenschaften nach der Definition aus Kapitel 1.1.1 lassen sich mit der im Folgenden vorgestellten Methode gut den Komponenten zuordnen und es lässt sich feststellen, ob und wenn ja welchen Beitrag die Komponente zu der jeweiligen Eigenschaft beiträgt.

Stellt man nun die Funktionen und Eigenschaften dar, so ergibt sich folgendes Bild, das in Abbildung 5-6 dargestellt ist: Die Funktionen werden strukturiert und in Teilfunktionen so-

⁴² Eine vollständige Erfassung aller Eigenschaften ist bei der Vielfalt und Komplexität heutiger technischer Produkte nicht möglich [STEINMEIER 1998]. Für die funktionalen Eigenschaften nach der Definition in Kapitel 1.1.1 ist dies allerdings sehr wohl möglich, hier bereitet die Strukturierung die größten Schwierigkeiten.

weit sinnvoll zerlegt, diese abstrakten Teilsysteme werden in der Entwicklung durch reale Systeme abgebildet, die über bestimmte Eigenschaften verfügen. Analog des in Abbildung 2-2 dargestellten Dreiecks der Anforderungen für die Fahrzeugentwicklung mit der wechselseitigen Beeinflussung wird die Eigenschaftspyramide abgeleitet, die in Abbildung 5-7 gezeigt ist. Die Einteilung erfolgt in der einen Richtung nach den relevanten und für die Fahrzeugentwicklung zentralen Eigenschaften NVH, Insassenschutz, Fußgängerschutz und Crash und in der anderen Richtung nach den Disziplinen Front, Seite und Heck⁴³. Auf der untersten Ebene sind die Komponenteneigenschaften, dann die Subsystemeigenschaften und am Schluss die Gesamtfahrzeugeigenschaften. Nach der Definition der Produktstruktur aus Kapitel 5.1.2 können die unteren Ebenen wiederum in sich eine hierarchische Struktur enthalten, es können sich folglich deutlich mehr als nur 3 Ebenen ergeben. Die Komplexität und auch die Integrationsleistung von unten nach oben steigen damit naturgemäß an, so dass für die Klassifizierung von Eigenschaften eine sinnvolle Systemgrenze gefunden werden muss, die sich nur teilweise an der Produktstruktur orientiert.

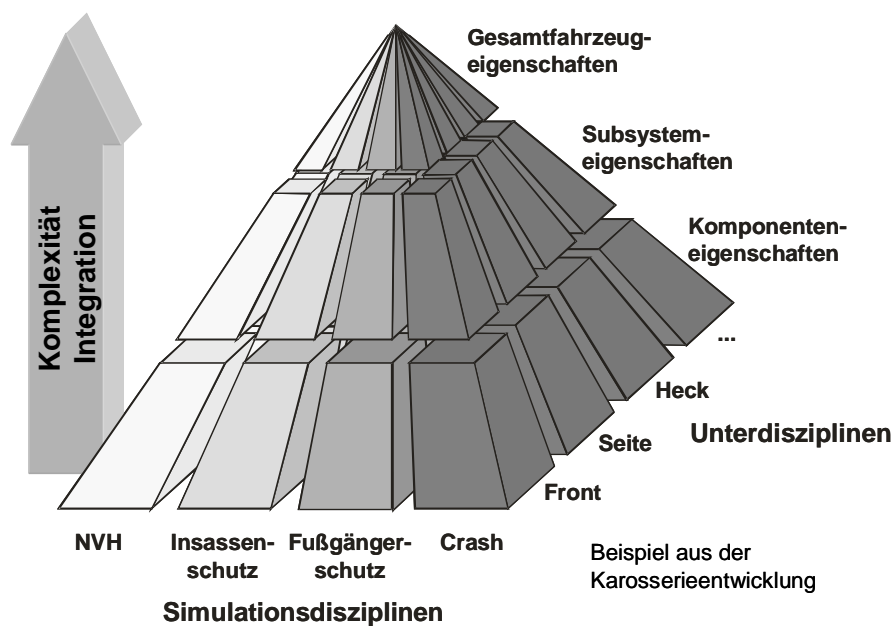


Abbildung 5-7: Eigenschaftspyramide für die Fahrzeugentwicklung

⁴³ Ergänzend sei angemerkt, dass diese Unterscheidung nicht für alle Anforderungen zutreffend ist, sie gilt mehrheitlich für die Fahrzeugsicherheit, wo u. a. nach Front-, Seiten- und Heckcrash unterschieden wird.

5.1.4 Verknüpfung von Produkt, Funktionen und funktionalen Eigenschaften

Differenzierung von Funktionen und Eigenschaften

In Ergänzung zu der Definition von Komponenten, Funktionen und funktionalen Eigenschaften in Kapitel 1.1.1 wird an dieser Stelle kurz auf den Zusammenhang zwischen den drei Begriffen eingegangen. Dies erscheint vor allem deswegen notwendig, weil die Bedeutung der Begriffe, vor allem die der Funktionen und Eigenschaften, in der Literatur der Konstruktionslehre und Produktentwicklung sehr heterogen belegt sind. Nach HUBKA [1984] ist eine Funktion eine von bestimmten Bedingungen der gegebenen Situation abstrahierte Eigenschaft, für technische Systeme sogar die wichtigste Eigenschaft, z. B. bei einem Fahrzeug Befördern/Fahren. Der wesentliche Unterschied zwischen Produkteigenschaften und Produktfunktionen ist die hierarchische Dekomposition [SALUSTRI & PARMER 2004]. Die Funktionen der Subsysteme auf Systemebene aggregiert ergeben die gewünschte Gesamtfunktion des Produktes, ohne dass die Funktionen der Subsysteme notwendigerweise die des Gesamtproduktes sind. Die Eigenschaften des Automobils auf Systemebene sind sicherlich nicht gleich der Summe der Eigenschaften der Subsysteme, gleichwohl ergeben sie sich wie die Funktionen aus dem Zusammenspiel der Subsysteme. Am Beispiel eines Automobils lässt sich dies gut erläutern: zum Fahren sind die Funktionen des Motors, der Karosserie, des Fahrwerks und der Elektrik notwendig, obwohl die Funktion des Subsystems Motor ja nicht Fahren, sondern Drehmoment und Drehzahl, also Leistung erzeugen, heißt. In Summe tragen also alle Subsysteme zur Funktion des Automobils bei. Bei den Eigenschaften kann dies anders sein: soll ein Fahrzeug beispielsweise besonders leicht sein, so müssen die Subsysteme notwendigerweise auch leicht sein, sonst ist die Eigenschaft Gewicht in der Summe je nach Zielgröße verfehlt. WALTHER [1994] unterscheidet zwischen konstanten und variablen Eigenschaften. In der numerischen Berechnung werden zwar ausschließlich variable Eigenschaften betrachtet, die konstanten Eigenschaften bilden jedoch für jeden Entwickler wichtige Randbedingungen, die es zu beachten gilt, beispielsweise äußere Abmessungen wie Radstand, Spurweite, Fahrzeuglänge, etc. In Abbildung 5-8 ist der Versuch unternommen, diese Zusammenhänge darzustellen. Aus den Anforderungen erwachsen die Funktionen und Eigenschaften, die wiederum, wie bereits gezeigt, abhängig voneinander sind. Nach der Abstraktion in Form einer Funktionsstruktur wird das Produkt konstruiert und somit die Eigenschaften und Funktionen umgesetzt in reale Komponenten. Wichtig ist der Rückschluss: die Summe der Komponenteneigenschaften entspricht nicht der Summe der Eigenschaften des Gesamtsystems.

Übertragen auf die Karosserieentwicklung sei ein weiteres Beispiel zum Zusammenhang von Funktionen und Eigenschaften genannt: für eine Crashanforderung, beispielsweise Frontcrash, wird ein bestimmtes Deformationsverhalten der Karosserielängsträger benötigt. Die Funktion der Struktur ist damit die Deformation, der Eingangsgröße ist die Crashenergie, Ausgangsgröße die aufgenommene und damit vernichtete Energie. Die Eigenschaften des Bleches sind als Merkmale sein Gewicht, der verwendete Werkstoff und seine Geometrie, als jeweilige Ausprägung dann die entsprechenden Werte. Die Deformation selbst hat jedoch auch Eigenschaften: durch die Umwandlung von kinetischer Energie wird das Blech um einen bestimmten Weg deformiert, d. h. Merkmal ist der Deformationsweg und Ausprägung dann der Zah-

lenwert. Daraus ist ersichtlich, dass es sinnvoll ist, im Kontext der Arbeit von Funktionen und funktionalen Eigenschaften zu sprechen, zumal damit auch die Sicht der Berechner repräsentiert werden soll.

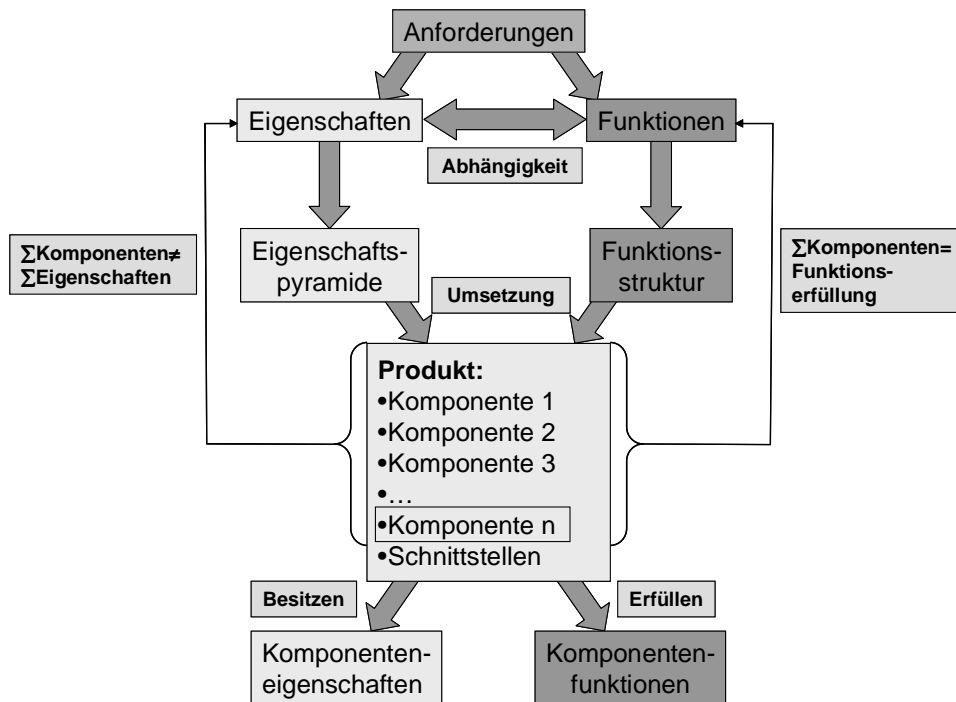


Abbildung 5-8: Zusammenhang zwischen Anforderungen, Funktion, Eigenschaft und Komponenten

Verknüpfung der Strukturen

Eines der Hauptprobleme in komplexen Systemen und so auch in der Integration von Konstruktion und Simulation ist die klare Identifikation von Elementen und deren Relationen untereinander, im Prinzip die Reduktion der Eingangsinformationen auf das für die Systemmodellierung und -verständnis notwendige Maß [FUCHS 2006]. Für den Konstrukteur ist es wichtig zu wissen, welches seiner Bauteile welchen Beitrag zur Erfüllung von Funktionen bzw. funktionalen Eigenschaften leistet. Angesichts der Vielzahl der Anforderungen ist dies nicht ohne weiteres möglich. Eine Abbildung der Produktstruktur auf die Funktionsstruktur und die Eigenschaftspyramide ist ebenfalls nicht möglich, weil Eigenschaften sich nicht wie die Produktstruktur nach z. B. Bauräumen oder funktionalen Einheiten gliedern lassen. Für die Erfüllung eines Frontcrashlastfalles ist beispielsweise nicht nur die Karosseriestruktur verantwortlich, sondern das Resultat ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Teilen der Karosserie, des Aggregats, des Fahrwerks und der Innenausstattung, die alle in verschiedenen Teilen der Produktstruktur angesiedelt sind. Umgekehrt benötigt der Simulationsingenieur nicht immer alle Komponenten für seinen Modellaufbau. Wie in Kapitel 4.3.3 in den Informationsbausteinen

gezeigt ist eine Vielzahl von Daten und Informationen notwendig, um ein Simulationsmodell aufzubauen. Wie ebenfalls gezeigt werden konnte ist ein erheblicher Zeitaufwand notwendig, um die Daten und Informationen zu sammeln und das Simulationsmodell aufzubauen. Hier könnte eine gezielte Filterung einen wichtigen Beitrag leisten, um schneller und damit effizienter zu werden. Es existiert derzeit keine Methode, um in der Simulation für komplexe Produkte die relevanten Bauteile zu selektieren und damit für die Simulation transparent zu machen. Hier treten die beiden unterschiedlichen Produktsichten wieder zutage: die komponentenbezogene Sicht der Konstrukteure und die funktionsorientierte Sicht der Simulation. In Abbildung 5-9 ist exemplarisch dargestellt, warum sich Produktstruktur und Eigenschaften so schwer verknüpfen bzw. integrieren lassen. Eine Eigenschaft hat Einfluss auf mehrere Komponenten der Produktstruktur und umgekehrt ist eine Komponente notwendig, um mehrere Anforderungen zu erfüllen. Das bedeutet, dass eine Methode gefunden werden muss, die eine Zuordnung von Komponenten zu Eigenschaften und umgekehrt ermöglicht, so dass eine Strukturierung der Dimension Produkt für die CAD-CAE-Integration erfolgen kann.

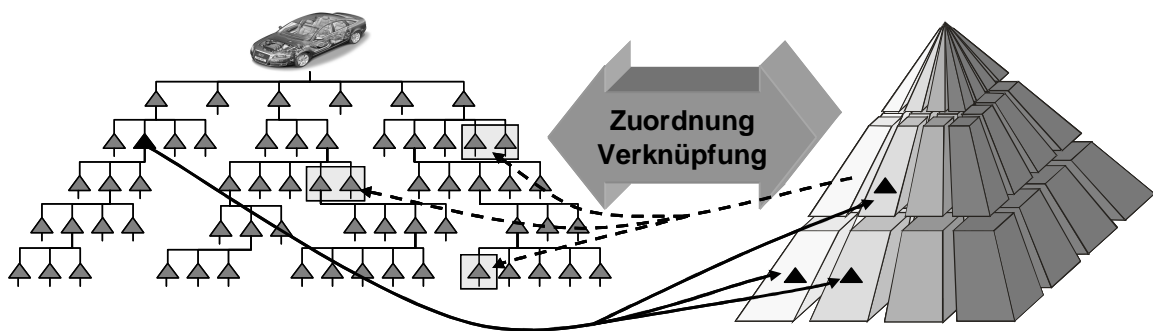


Abbildung 5-9: Verknüpfung von Produktstruktur und Eigenschaftspyramide

5.2 Die Einflussmatrix

Im Folgenden wird die Einflussmatrix vorgestellt, die eine bewährte Methode ist, um Systeme zu strukturieren und in ihren Relationen darzustellen und somit Transparenz herzustellen.

5.2.1 Die Systematik der Einflussmatrix

Eine Matrix⁴⁴ eignet sich nach BONGULIELMI [2002] besonders gut, um zwei Sichten gegenüberzustellen, im Falle der CAD-CAE-Integration die der Konstruktion und die der Berechnung. Darüber hinaus hat eine Matrix weitere Vorteile [BONGULIELMI 2002]:

- Kompaktheit der Informationsdarstellung
- Möglichkeit der systematischen Abbildung der Elemente eines Systems
- Klare und lesbare Darstellung⁴⁵

Ein zusätzlicher Vorteil mathematischer Art ist die Linearität einer Matrix. Die Verbindungen von Elementen innerhalb einer Matrix sind linear und können somit als lineare Funktionen aufgefasst werden. Das bedeutet, dass jedes Kästchen der Matrix wiederum als eine Untermatrix aufgefasst werden kann und Systeme somit in beliebiger Granularität zerlegbar sind, wenn notwendig bis auf die kleinstmögliche Einheit. Nachteil dabei ist, dass diese Strukturierung streng hierarchisch ist.

Zur Darstellung von wechselseitigen Einflüssen ist die Einflussmatrix (synonym DSM – Design Structure Matrix⁴⁶) besonders geeignet, die von STEWARD [1981] eingeführt wurde. Es wird eine logische Richtung definiert und dann die Wirkung der Elemente in den Zeilen und Spalten dargestellt [LINDEMANN 2007]. Die Intensität der Verknüpfung kann über Zahlenwerte gesteuert werden, auf diese Weise lassen sich beispielsweise wünschenswerte von notwendigen Relationen unterscheiden [PIMMLER & EPPINGER 1994]. Zusätzlich lassen sich beliebige Gewichtungen definieren, um den Grad der Beeinflussung abzubilden. In Abbildung 5-10 ist eine Einflussmatrix für Eigenschaften mit der entsprechenden Gewichtung abgebildet. Mit der Gewichtung lässt sich die Wichtigkeit von Eigenschaften für die Auslegung abbilden. Aufsummiert über den Spalten wird die Passivsumme gebildet, über die Zeilen die Aktivsumme. Damit können Rückschlüsse gezogen werden, ob ein Element eher aktiv, also die anderen beeinflussend wirkt, oder eher passiv, also eher von anderen Elementen beeinflusst wird. Die

⁴⁴ Auf weitere Entwicklungsmethoden, die ebenfalls Einflüsse bzw. Relationen in Matrixform abbilden, wie z. B. House of Quality, sei an dieser Stelle wegen fehlender Relevanz nicht eingegangen und stattdessen auf die einschlägige Literatur verwiesen [EHRENSPIEL 2003], [CONRAD 2005].

⁴⁵ Dies gilt nach Ansicht des Autors nur sehr eingeschränkt. Wie zu zeigen sein wird kann eine Matrix für komplexe Systeme, wie z. B. Komponenten und Eigenschaften eines Fahrzeugs, so groß werden, dass sie weder vernünftig lesbar noch einfach interpretierbar ist, übergreifende Strukturzusammenhänge können nicht sinnvoll visualisiert werden [LINDEMANN & MAURER 2006]. In solchen Fällen ist Rechnerunterstützung und z. B. die Verwendung von Graphen unabdingbar [LINDEMANN & MAURER 2006].

⁴⁶ Einige Autoren verwenden die deutsche Übersetzung Design (!) Struktur Matrix, in der vorliegenden Arbeit bleibt es in diesem Zusammenhang bei der englischen Bezeichnung. Außerdem existiert ebenfalls der Begriff der Dependency Structure Matrix [DANILOVIC & BROWNING 2004], im Kontext der Arbeit bleibt es bei der Einflussmatrix.

Kritikalität ist das Produkt aus Aktiv- und Passivsumme, Elemente mit hoher Kritikalität sind kritische, mit niedriger Kritikalität träge Merkmale [LINDEMANN 2007].

	Funktionen								Aktivsumme		Kritikalität		
	Eigenschaft 1	Eigenschaft 2	Eigenschaft 3	Eigenschaft 4	...	ungewichtet	gewichtet	ungewichtet	gewichtet				
Gewichtung		3		5		10		1					
Eigenschaft 1			0	0	0	0	9	9		9	9	54	162
Eigenschaft 2	3	9			0	0	0	0		3	9	27	405
Eigenschaft 3	3	9	9	45			0	0		12	54	36	1620
Eigenschaft 4	0	0	0	0	3	30				3	30	27	243
...													
Passivsumme	6	18	9	45	3	30	9	9					

Abbildung 5-10: Einflussmatrix mit Gewichtung nach ULRICH & EPPINGER [2000]

Die in Abbildung 5-10 dargestellte Matrix ist eine Einflussmatrix, die den Einfluss der Elemente eines Systems untereinander darstellt, also einer Domäne, für die Integration von Komponenten und Eigenschaften ist jedoch die Verknüpfung von zwei Domänen notwendig. EICHINGER ET AL [2006] weisen darauf hin, dass die Produkt-Domänen nicht unabhängig voneinander sind, es können beispielsweise nur die Relationen von Komponenten oder Funktionen jeweils für sich analysiert, eine Betrachtung der Relationen untereinander ist nicht möglich. Daher werden von DANILOVIC & BROWNING [2004] die Domain-Mapping-Matrix (DMM) bzw. von BONGULIELMI [2002] die Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrix eingeführt. Die DMM ist ein ergänzender Ansatz zur DSM, mit dem die Relationen zwischen zwei unterschiedlichen Systemen sichtbar gemacht werden können, z. B. um Informationsflüsse zwischen Systemen darzustellen, Aktivitäten zwischen Systemen zu synchronisieren und die Verbesserung und Erhöhung der Transparenz von Entscheidungen im Entwicklungsprozess [DANILOVIC & BROWNING 2004]. Die Einflussmatrix ist ein wichtiges Werkzeug zur Zerlegung und Neustrukturierung bzw. Integration komplexer Systeme geworden [BROWNING 2001]. Das Füllen der Matrix ist aber nur ein erster Schritt, der, wie in Kapitel 5.3 gezeigt werden wird, wichtig und notwendig ist und bereits erste Interpretationsmöglichkeiten des Systems zulässt, für eine weitere Strukturierung aber sind weitere Schritte notwendig. Nach KUSIAK [1999] kann mittels eines Algorithmus die Matrix strukturiert werden, d. h. es werden Cluster gebildet, die als in sich geschlossene Subsysteme interpretiert werden können. Eine weitere Möglichkeit ist die Erstellung eines Graphen aus der Matrix, da im Umkehrschluss Matrizen gut geeignet sind, Graphen zu repräsentieren [TITTMANN 2003], worauf aber im Folgenden nicht näher eingegangen wird, da dies noch keine Relevanz für die Problematik der Integration von Konstruktion und Simulation hat. In Abbildung 5-11 ist die Strukturierung einer DMM dargestellt, die Pakete sind deutlich erkennbar. Wie die Strukturierung für die

Integration von Konstruktion und Simulation verwendet werden kann, wird im Kapitel 6 gezeigt.

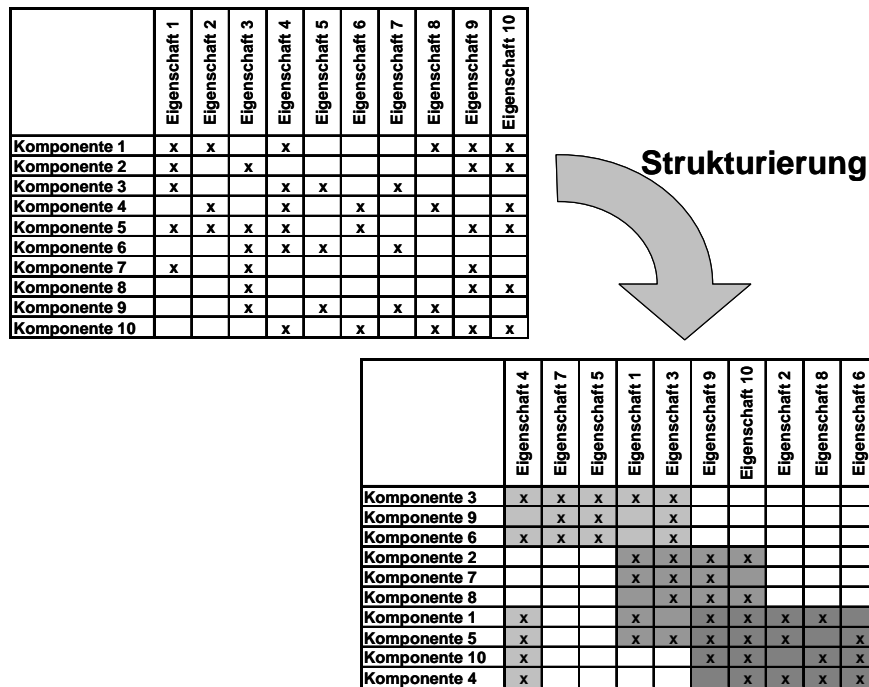


Abbildung 5-11: Strukturierung einer Einflussmatrix in Anlehnung an KUSIAK [1999]

5.2.2 Anwendungen der Einflussmatrix

Die Methode der Einflussmatrix zur Strukturierung von Systemen ist nicht neu. Im Folgenden werden deshalb ein paar weitere Anwendungsbeispiele erläutert, die jedoch teilweise durchaus weitere Verwendung für den Konstruktions- und Simulationsprozess finden könnten. STEWARD [1981] schlägt die DSM als Möglichkeit vor, Prozesse zu strukturieren, Informationsflüsse klar zu machen und Iterationen besser zu beherrschen. Als Methode zur Prozessstrukturierung wird die DSM auch von KUSIAK [1999] verwendet, die Verknüpfungen zwischen Zeile und Spalte definieren eine Beziehung zwischen den Elementen. Durch Triangularisierung und Übersetzung der Matrix in einen Graph kann so ein Prozessmodell von logisch aufeinander folgenden, weil abhängigen Aktivitäten im Entwicklungsprozess erstellt werden.

BONGULIELMI [2002] kombiniert die DSM und die DMM zur Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrix (K- & V-Matrix). Mit der Verträglichkeitsmatrix werden dabei Elemente innerhalb einer Domäne auf ihre Konsistenz überprüft, z. B. ob Anforderungen kompatibel sind. Übertragen auf die Problemstellung der Integration von Konstruktion und Simulation könnte dies beispielsweise mit Eigenschaften durchgeführt werden, um eklatante Widersprüche be-

reits früh im Prozess zu identifizieren, vgl. HUBKA [1984]. Die Konfigurationsmatrix schließlich verbindet die beiden Domänen und dient der Abbildung der Korrelation der beiden Domänen. HENSELER [2004] verbindet die K- & V-Matrix mit einem vereinfachten CAD-Modell, um als Schnittstelle zum Kunden Produktkonfigurationen durchführen zu können. Dies ist bereits ein erster Schritt in Richtung der Verbindung der Einflussmatrix mit den CAX-Systemen, der für die Integration der Methode in Entwicklungsprozesse sicher weiter ausgebaut werden muss. Eine sehr weit verbreitete Einsatzmöglichkeit der Einflussmatrix ist im Zusammenhang mit Modularisierung und Variantenmanagement zu sehen [GROBE ENTRUP 2004]. Ziel ist es dabei, die Schnittstellen so zu definieren, dass sich sinnvolle Module in der Produktstruktur identifizieren lassen, die funktionale und bauraumtechnische Einheiten darstellen. RAPP [1999] verwendet u. a. die Design Structure Matrix als Hilfsmittel zur Strukturierung von Produkten, indem er den Einfluss von technischen Parametern aufeinander analysiert und so bei Änderungen von Parametern die Folgen abschätzen kann.

WALTHER [1994] modelliert mit Hilfe von Matrizen komplexe technische Systeme⁴⁷ wie z. B. ein Automobil. Dazu erfasst er die Eigenschaften und Funktionen der Systeme und modelliert sie in ihren wechselseitigen Abhängigkeiten, allerdings unter Verwendung von kleineren Matrizen für Subsystemebene, die auf Gesamtsystemebene dann kombiniert werden. Damit können u. a. qualitative Einflüsse von Änderungen eines Elementes auf verknüpfte Elemente festgestellt werden. Ebenfalls in der Literatur und Industrie zu finden ist die Verknüpfung von Komponenten mit Funktionen, wie sie z. B. EICHINGER ET AL [2006] mit einer DMM vorschlagen. GROBE WIENKER [2003] definieren eine Verknüpfung zwischen Produkt- und Funktionsstrukturen und fassen somit sinnvolle funktionale Module zusammen. SCHITTNY & SCHÖPF [2006] übersetzen Anforderungen in lösungsneutrale Produktfunktionen und koppeln diese schließlich an Module. Auf diese Weise können neben anderen Funktionalitäten die Schnittstellen für Module (und damit ihren Einsatz in verschiedenen Produkten) definiert werden. Eine weitere Möglichkeit, die Einflussmatrix einzusetzen ist für die Strukturierung und Organisation von Entwicklungsteams, die in Kapitel 6.1 vorgestellt wird.

5.3 Verknüpfung von Komponenten mit funktionalen Eigenschaften

Wie gezeigt wurde ist die Einflussmatrix eine bewährte Methode, um wechselseitige Abhängigkeiten darzustellen. Eine zentrale Abhängigkeit in der Produktentwicklung ist die Wechselwirkung von Komponenten und Eigenschaften. Fasst man die Komponente als Sicht der Konstruktion auf das Produkt auf und die funktionale Eigenschaft als Sicht der Simulation, so folgt daraus zwangsläufig, dass einer Verknüpfung von Komponenten und funktionalen Ei-

⁴⁷ Die von WALTHER [1994] vorgestellte Methode zur Modellierung von komplexen Systemen ist sehr aufwendig, so dass das Hauptproblem, die Erfassung der Relationen, nach wie vor bestehen bleibt, vgl. Kapitel 6.4. Vor allem bestehen erhebliche Zweifel beim Autor, ob ein derart formales Vorgehen dem Wesen von komplexen Systemen, das die Automobilentwicklung nach WALTER [1994] darstellt, gerecht wird. Häufig erzeugt ein hoher Formalisierungsgrad scheinbare Verlässlichkeit, der nicht formalisierbare Teil der Ingenieurskunst, der Mensch, ist dabei aber genauso wichtig, wenn nicht sogar wichtiger [IGENBERGS 1991].

enschaften auch eine Integration der Sichten von Konstruktion und Simulation folgt. Bis zu einer Integration nach den im Kapitel 3.2 aufgespannten Dimensionen in dem Problemsystem ist allerdings noch ein weiter Weg, die Vorteile und Anwendungen einer Verknüpfung der Sichten sind schließlich im Kapitel 6 erläutert.

Mit einer Matrix können die Einflüsse von Komponenten auf Eigenschaften klar herausgearbeitet werden, d. h. die Frage, welche Komponente trägt zu der Erfüllung bzw. Nicht-Erfüllung welcher Eigenschaft bei, kann somit beantwortet werden. Genauso können umgekehrt für die Simulation die für den jeweiligen Lastfall notwendigen Komponenten gefunden werden. Dabei folgt diese Logik dem Postulat, dass Komponente und Funktion bzw. Eigenschaft nicht trennbar sind. Zwar lassen sich Funktionen, wie oben gezeigt, abstrakt modellieren, z. B. nach PATZAK [1982], aber mit zunehmendem Entwicklungsfortschritt sinkt der Abstraktionsgrad und die konstruierten Komponenten müssen über bestimmte Eigenschaften verfügen, um die geforderten Funktionen zu erfüllen. PEATZOLD [2006] weist in diesem Zusammenhang auch darauf hin, dass zusätzlich zum DMU (Digital Mock Up), mit dem hauptsächlich geometrische Stimmigkeit und Baubarkeit, also Aspekte der Fertigung, geprüft werden, ein prozessbegleitendes Functional Mock Up notwendig ist, mit dem die Funktionen des Produktes laufend geprüft werden können. Voraussetzung dafür aber muss sein, dass die einzelnen Komponenten laufend an ihren Anforderungen gespiegelt werden können, was bei komplexen Produkten, bei denen die meisten Anforderungen aus dem Zusammenspiel der Komponenten resultieren, nicht einfach möglich ist.

Angesichts der Fülle von Daten und Dokumenten im Entwicklungsprozess, wie z. B. CAD-Daten, Lasten- und Pflichtenhefte, Anforderungslisten, etc. fällt es den Konstrukteuren und Berechnern immer schwerer festzustellen, welchen Reifegrad das Produkt bzgl. der funktionalen Anforderungen zu einem definierten Zeitpunkt besitzt. Eine Verknüpfung der Komponenten mit den Anforderungen kann hier die Basis für eine Verknüpfung der Sichten auf das Produkt dienen und damit den Abgleich von Komponenten und Anforderungen darstellen. Für die Simulation ist es umgekehrt schwierig angesichts von unterschiedlichen Produktreifegraden der Komponenten ein Ergebnis der funktionalen Eigenschaften und damit der Reife des Produktes zu liefern, wenn die Komponenten untereinander nicht stimmig sind. Dies ist klassischerweise für designrelevante Umfänge des Fahrzeugs der Fall, denn das Bestreben der Fahrzeughersteller geht mit der Unterstützung der virtuellen Entwicklung immer mehr dahin, Designentscheidungen sehr spät zu treffen, die aber möglicherweise erhebliche Auswirkungen auf die funktionalen Eigenschaften des Fahrzeugs haben können. Daher ist eine Integration von Konstruktion und Simulation durch eine Integration der Sichten auf das Produkt in Form der Verknüpfung von Komponenten und Funktionen unbedingt notwendig, um diesem Trend zu begegnen und die Entwicklungsmethodik entsprechend anzupassen. Im folgenden Kapitel wird daher der Aufbau der Bauteil-Lastfall-Matrix erläutert, welche Eingangsdaten nötig sind und wie die Matrix umgesetzt werden kann. Wie in Kapitel 1.1.1 definiert sind die Lastfälle die in eine berechenbare Einheit übersetzten Anforderungen, aus denen die Eigenschaften durch die Ergebnisse der numerischen Simulation resultieren, somit hängen Eigenschaften und Lastfälle unmittelbar zusammen. Um sich der Sprach- und Begriffswelt der Berechnungsingenieure anzupassen wird die Bauteil-Eigenschafts-Matrix in eine Bauteil-Lastfall-Matrix umbenannt.

Die prinzipielle Systematik ist in Abbildung 5-12 dargestellt: die Eingangsdaten für die Spalten liefert die Produktstruktur mit den Komponenten. Die Eingangsdaten für die Zeilen liefern die funktionalen Eigenschaften. Die Matrix kann jedoch keine Hierarchien und Kategorien abbilden, so dass die Komponenten und Eigenschaften jeweils einzeln erfasst werden und die Produktstruktur und die Eigenschaftspyramide nicht abgebildet werden. Sie dienen als Eingangsinformationen, da eine Vorselektion stattfinden muss, welche Hierarchieebenen einbezogen werden müssen. Wie in Kapitel 5.3.2 zu zeigen ist, kann die Matrix die Hierarchien allerdings dann abbilden, wenn sie nicht zur Strukturierung eines Systems durch Neuordnung verwendet wird, sondern lediglich die Einflüsse abbildet, siehe dazu Abbildung 5-15.

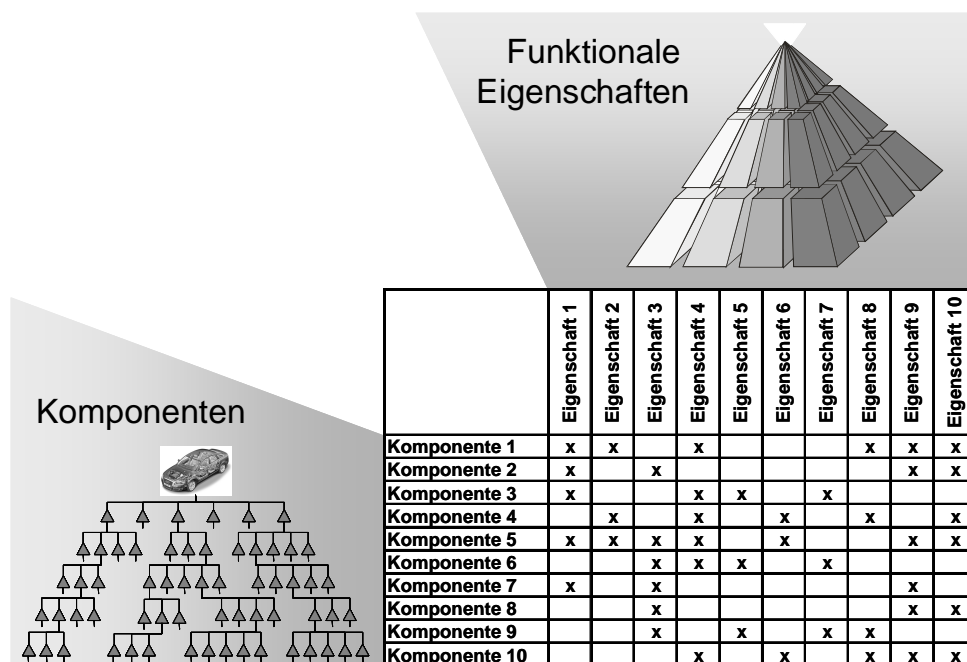


Abbildung 5-12: Verknüpfung von Komponenten und funktionalen Eigenschaften mit einer Einflussmatrix

5.3.1 Sammlung der benötigten Daten

Angesichts der Fülle von funktionalen Eigenschaften und der großen Zahl an Komponenten eines Fahrzeugs, ist eine Vorauswahl und Eingrenzung der Eingangsdaten für die Bauteil-Lastfall-Matrix notwendig. Die Definition einer Systemgrenze, d. h. dem Detaillierungsgrad des Systems, ist so zu wählen, dass das System noch in der Lage ist, eine Aussage über das Verhalten zu ermöglichen und diese auch zu interpretieren [Fuchs 2006]. Für eine erste Umsetzung der Matrix werden daher nicht alle Komponenten des Fahrzeugs herangezogen. Nach dem Wesen von Eigenschaften, die nicht nur für eingeschränkte Komponenten gültig sind, betreffen viele der Lastfälle das Gesamtfahrzeug, das allerdings für eine exemplarische Um-

setzung und Verifizierung der Methode zu umfangreich ist. Es ist auch schlicht nicht möglich, abgesehen von der Sinnhaftigkeit, alle Einzelteile eines Fahrzeugs zu erfassen. Für einfache Produkte mag dies möglich sein, für komplexe Produkte in keinem Fall. Es ist daher wichtig, in der Produktstruktur bereits eine sinnvolle Vorstrukturierung vorzunehmen und Komponenten zu Subsystemen zusammenzufassen. So ist es beispielsweise sinnvoll, Teile des Sitzes zusammenzufassen, sofern keine separaten Festigkeitsanforderungen des Sitzes analysiert werden. Der Rohbau als die Struktur des Fahrzeugs ist für die meisten Lastfälle der Karosserie extrem wichtig, so dass hier eine Aufspaltung bis auf Einzelteilebene erfolgt. Durch die Linearität der Matrix ist es im Nachhinein aber möglich, Subsysteme weiter aufzuspalten, sofern die Notwendigkeit dazu besteht.

Eine weitere Einschränkung wird bzgl. der Lastfälle getroffen: es werden nur mechanische Lastfälle betrachtet, die mit der FEM berechnet werden, keine Strömungssimulationen. Bezüglich der strukturellen Einordnung der Lastfälle zur Produktstruktur werden in einem ersten Schritt nur die Lastfälle der oberen Ebenen der Produktstruktur betrachtet. Die mittlerweile sehr zahlreichen und oft durchgeführten Simulationen auf lokaler Komponentenebene, z. B. Missbrauchslastfälle, werden ebenfalls nicht in Erwägung gezogen. Hier liegt aber ein großes Potential der Matrix, wie in 6.3 zu zeigen sein wird.

Zu den wichtigsten Simulationsdisziplinen in der Karosserieentwicklung zählen Crash, NVH, Insassenschutz und Fußgängerschutz als relativ neue Disziplin. In Abbildung 5-13 sind die Lastfallgruppen dargestellt, die jeweils über Untergruppen verfügen. So teilt sich der Crash beispielsweise auf in die Lastfallgruppen Front, Seiten-, Heckcrash, Dachsteifigkeit, Gurtzug und Typschaden auf. In den Lastfallgruppen stehen dann die einzelnen Lastfälle, die z. B. eine gesetzliche Forderung repräsentieren oder Verbraucherschutztests. Die Lastfallgruppen dienen gleichzeitig als Vorbild für die Anordnung der einzelnen Lastfälle in der Matrix.

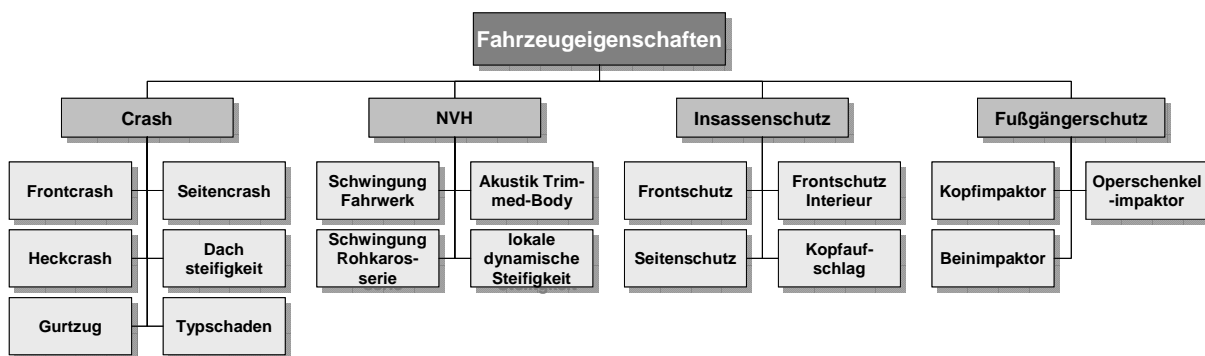


Abbildung 5-13: Struktur der berücksichtigten Lastfälle für die Bauteil-Lastfall-Matrix

Vom Fahrzeug werden die für die Lastfallgruppen am stärksten betroffenen Komponenten ausgewählt: Karosserie, Fahrwerk und Aggregate. Dabei werden die Subsysteme in unterschiedlicher Granularität betrachtet: während z. B. der Motor als Ganzes betrachtet wird, wird die Rohkarosserie in ihre Einzelteile zerlegt und abgebildet. Hier kann bereits ein erster Nutzen der Matrix festgestellt werden: Komponenten, die als funktionale Einheiten zur Erfüllung

bestimmter übergeordneter Anforderungen beitragen, sollten nicht weiter in der Simulation und damit der Bauteil-Lastfall-Matrix detailliert werden. In Abbildung 5-14 sind die Komponenten, die für die Bauteil-Lastfall-Matrix herangezogen werden, dargestellt.

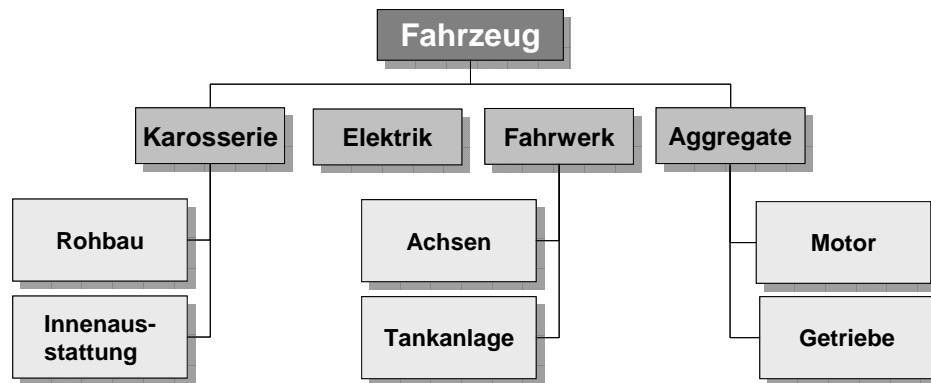


Abbildung 5-14: Gliederung der Fahrzeugstruktur

5.3.2 Umsetzung in der Bauteil-Lastfall-Matrix

Die Einflussmatrix ist ein Modell⁴⁸ und hängt in ihrer Aussagekraft davon ab, wie die Qualität der Eingangsdaten ist und wie und ob die Relationen richtig gesetzt werden. MAURER ET AL [2006] weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die Füllung einer Einflussmatrix von vielen Faktoren, so z. B. der Charakteristik der Relationen und dem persönlichen Erfahrungshorizont des Ingenieurs, abhängt. In die Spalten werden die Komponenten, in die Zeilen die Lastfälle eingetragen. Die Komponenten beeinflussen somit die Lastfälle, d. h. eine Komponente ist für einen Lastfall relevant oder nicht. Dabei kann diese Relevanz unterschiedliche Ausprägungen haben: die Komponente kann entscheidend für die Funktionserfüllung sein oder eine untergeordnete Rolle spielen. Eine weitere Differenzierungsmöglichkeit kann die Unterscheidung nach notwendigen und zu berücksichtigenden Komponenten für den Aufbau des Simulationsmodells sein. Da als Kernaussage der Matrix in erster Linie von Interesse ist, wie sich die Komponenten und Funktionen gegenseitig beeinflussen, werden folgende Relationen definiert:

- 3: Auswertung der Komponente. Die Komponente wird für den Lastfall in der Simulationsauswertung speziell über Abbildungen, Diagramme, Werte oder geometrische Optimierungen betrachtet.

⁴⁸ Über die Schwierigkeiten beim Aufbau und im Umgang mit Modellen sei auf FUCHS [2006] verwiesen. Kernproblem jeden Modells ist es, dass es eine Repräsentation der Wirklichkeit ist und die Prognosegüte maßgeblich von den Modellierungsmethoden abhängt. Keine Methode und kein Modell ist zu 100% akkurat [MAURER ET AL 2006].

- 2: Komponente gehört zum Modellumfang. Das Simulationsmodell muss die Komponente enthalten, sie wird aber nicht explizit ausgewertet.
- 1: die Komponente kann optional zum Modellumfang gehören, ist für den Lastfall aber nicht explizit notwendig.
- 0 (kein Eintrag): die Komponente ist für den Lastfall nicht relevant.

Um die Relationen setzen zu können, ist zunächst die Auswertung von verschiedenen Quellen notwendig. Diese Quellen sind die Simulationsmodelle selbst, PDM-Systeme mit CAD- und CAE-Daten, Lastenhefte und nicht zuletzt Befragungen von Ingenieuren aus der Konstruktion und der Simulation. Bei dem Ausfüllen der Matrix ist zu beachten, dass sich zwischen den Lastfällen natürlich Analogien ergeben und auch nicht jeder Lastfall explizit simuliert wird, sondern Lastfälle mit niedrigeren Anforderungen meist nur zur Kontrolle, aber nicht als gezieltes Auslegungskriterium simuliert werden.

Resultat der Auswertungen ist schließlich die Bauteil-Lastfall-Matrix, die trotz der getroffenen Einschränkungen mit 52.000 Feldern (131 Lastfälle, 400 Komponenten) einen enormen Umfang hat. Ein Ausschnitt der Matrix ist in Abbildung 5-15 dargestellt, auf eine komplette Darstellung muss wegen der Größe und aus Geheimhaltungsgründen an dieser Stelle verzichtet werden. Die Umsetzung erfolgte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel, wobei sich auf dem Markt mittlerweile andere System für Einflussmatrizen etablieren, so z.B. Mofleps (MOdelling Of FLExible Product Structures) vom Lehrstuhl für Produktentwicklung der TU München [LINDEMANN & MAURER 2006] und LATTIX [DSM 2006]. Für eine erste exemplarische Umsetzung sind die Möglichkeiten von Excel jedoch völlig ausreichend, zumal sich über Schnittstellen Programme zur Filterung und Clusterung der Matrix erstellen lassen.

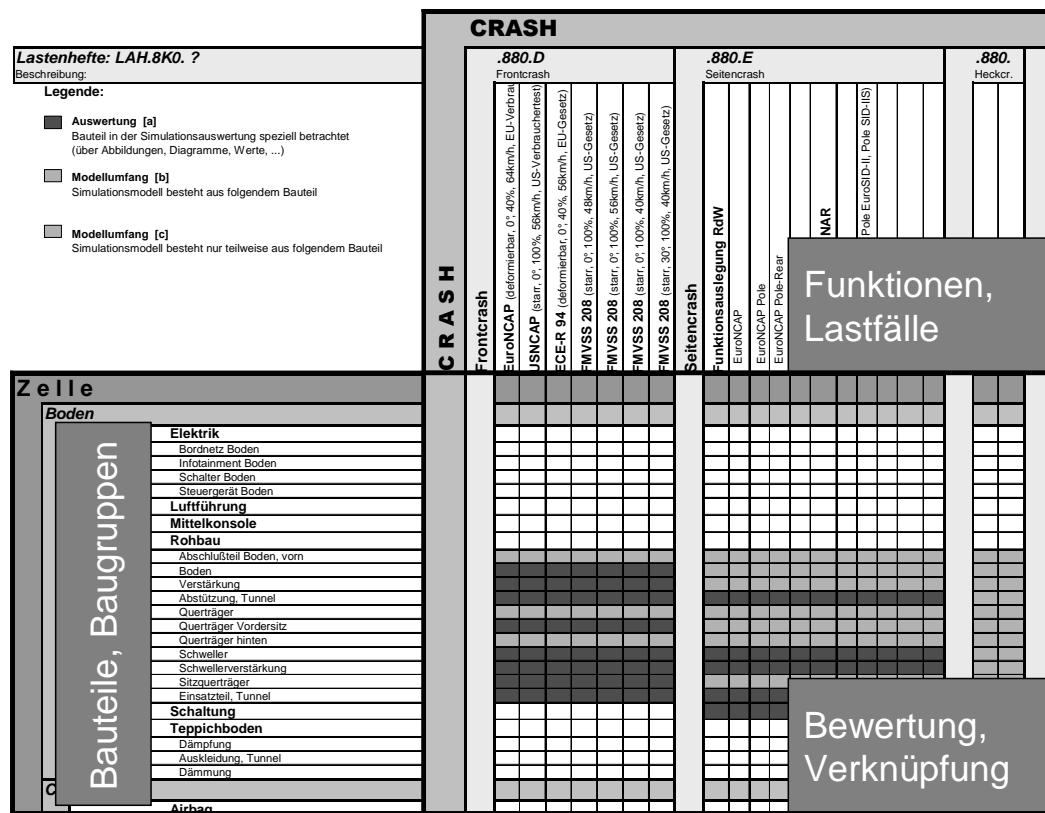


Abbildung 5-15: Ausschnitt aus der Bauteil-Lastfall-Matrix

Für eine bessere Beherrschung und Übersichtlichkeit der Matrix eignen sich Filter, nach denen Lastfälle und Komponenten selektiert werden können. Somit lassen sich gezielt Sichten auf die Matrix erzeugen, welche Komponenten mit welchen Lastfällen zusammenhängen. Ein solcher Filter ist in Abbildung 5-16 gezeigt, es lassen sich entweder Lastfälle oder Bauteile auswählen und die Matrix entsprechend filtern lassen. Auf diese Weise kann der Konstrukteur sehr schnell feststellen, für welche Lastfälle seine Komponenten eine Rolle spielt. Umgekehrt kann der Simulationsingenieur durch Selektion eines Lastfalls die Bauteile, die für den Modellaufbau benötigt werden, identifizieren. In dem in Abbildung 5-16 gezeigten Beispiel wird die Matrix nach den Umfängen Sitzquerträger gefiltert, d. h. es werden nur die Lastfälle einblendet, bei denen der Sitzquerträger betroffen ist. Dies lässt sich beliebig mit allen in der Matrix dargestellten Umfängen durchführen.

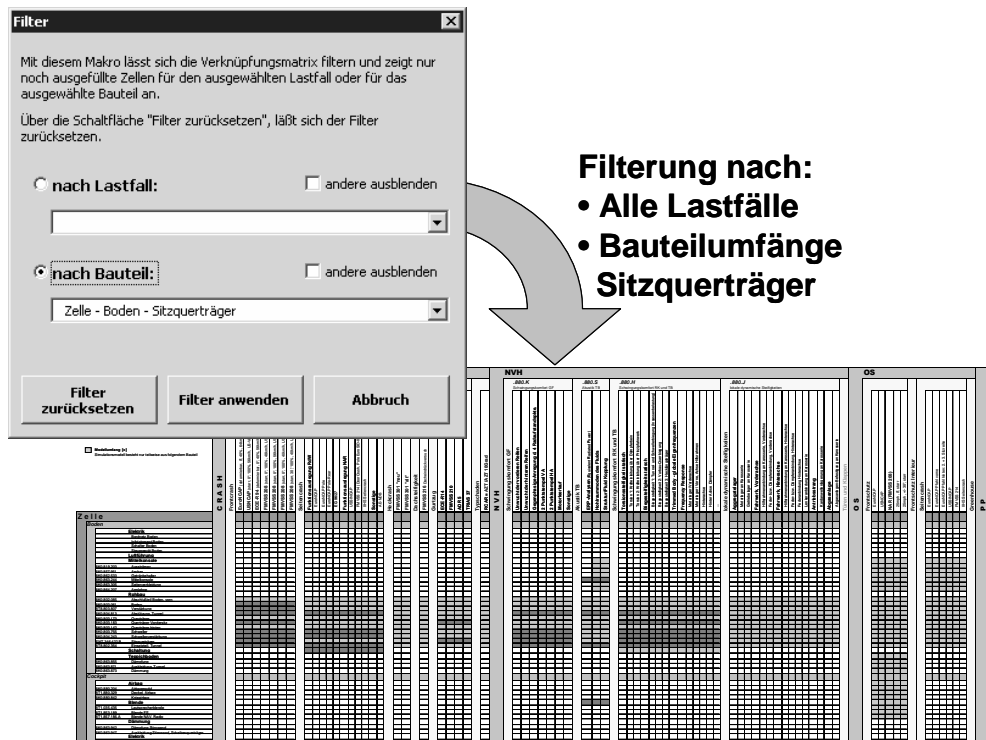


Abbildung 5-16: Filterfunktion der Bauteil-Lastfall-Matrix

5.4 Zusammenfassung Kapitel 5

Im fünften Kapitel wurde die Komplexität des Systems Konstruktion und Simulation in seinen wesentlichen Grundlagen erläutert. Der Prozess, in dessen Rahmen die Konstruktion und Simulation in der Fahrzeugentwicklung eingepasst sind, ist hochgradig komplex, so dass Methoden aus der Systemtheorie diese Komplexität beherrschbar machen müssen. Eine wesentliche Ursache für die Komplexität in Konstruktion und Simulation ist die schwierige Strukturierung von Produkten, Funktionen und Eigenschaften. Dabei sind Funktionen und Eigenschaften nicht trennbar, sondern hängen unmittelbar zusammen. Die bislang unterschiedliche Behandlung von Komponenten und funktionalen Eigenschaften muss durch eine Verknüpfung der beiden aufgehoben werden. Darauf aufbauend lassen sich dann weitere Integrationsansätze für die Konstruktion und Simulation definieren.

Vorgeschlagen wird für die Verknüpfung die bewährte Methode der Einflussmatrix, die bereits in der Konstruktionsmethodik für verschiedene Problemstellungen etabliert ist. Anwendung findet die Matrix in Form der Bauteil-Lastfall-Matrix, die Teile der Komponenten und Eigenschaften erfasst und zueinander in Relation setzt. Die Matrix ist ein erster Schritt und bildet die Grundlage für weitere Anwendungen zur Integration von Konstruktion und Simula-

tion, die Gegenstand des nächsten Kapitels sind. Nach dem in Kapitel 3.2 entwickelten Problemsystem der Integration von Konstruktion und Simulation ordnet sich der Ansatz in die Dimension Produkt ein, da hier die wesentlichen Sichten auf das Produkt, Komponente und Eigenschaft, strukturiert und verknüpft werden. Anwendungen der Methode gehen aber über die Dimension Produkt hinaus, wie in Kapitel 6 zu zeigen sein wird.

6. Anwendungen und Weiterentwicklungen der Bauteil-Lastfall-Matrix

Hauptansatz der Bauteil-Lastfall-Matrix ist die Schaffung von Transparenz und zur Unterstützung von klaren Informationsflüssen in komplexen Produktentwicklungen. Dazu werden die Komponenten mit den Lastfällen in Relation gesetzt. Wie in Kapitel 3 und 4 dargelegt bildet die Kommunikation einen der Hauptansatzpunkte einer Integration zwischen Konstruktion und der Simulation. Die Verknüpfung von Bauteilen mit Funktionen kann dabei mit unterschiedlichen Interpretationen den Kommunikationsprozess unterstützen. Das ist zum einen möglich durch die Bildung von virtuellen Teams, die nach Funktionen, nicht nach Komponenten aufgestellt werden und auch die bestehenden Organisationsstrukturen in einem Unternehmen unberührt lassen. Zum anderen können die in Kapitel 4 erarbeiteten Informationsbausteine genutzt werden, um die Versorgung der Konstrukteure und Berechner mit den notwendigen Informationen zu verbessern.

Außerdem werden Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Bauteil-Lastfall-Matrix erörtert, so z. B. als Hilfsmittel zum Aufbau von Simulationsmodellen für die FEM-Berechnung. Die beiden Ansätze zur Verbesserung der Kommunikation, die weiteren Interpretations- bzw. Einsatzmöglichkeiten und eine kritische Bewertung der Bauteil-Lastfall-Matrix werden im Folgenden erläutert.

6.1 Die Bauteil-Lastfall-Matrix als Kommunikationsunterstützung im funktions- und eigenschaftsorientierten Entwicklungsprozess

Wie in Kapitel 3 und 4 gezeigt ist die Kommunikation zwischen den Ingenieuren in der Konstruktion und Simulation ein wichtiger Baustein zur Effizienzsteigerung in der Fahrzeugentwicklung. Eine Möglichkeit, die Kommunikation zu unterstützen, ist die Bildung von Arbeitsteams. Obwohl die Wirksamkeit der Teamarbeit in der Wissenschaft Gegenstand intensiver Diskussionen und Forschungen ist und KALJAS & REEDIK [2005] betonen, dass menschliche Fähigkeiten – Kompetenz und Expertenwissen – eine sehr große Rolle für den Erfolg von Teams spielen, so wird von der These ausgegangen, dass Teamarbeit den Kommunikationsprozess im Sinne des wechselseitigen Informationsaustausches und des gemeinsamen Verständnisses fördert. Der Ansatz ordnet sich somit in die Verknüpfung der Dimensionen Produkt und Mensch nach dem in Abbildung 3-15 dargestellten Problemsystem der CAD-CAE-Integration ein.

6.1.1 Eigenschaftsorientierte Teams in der Produktentwicklung

Für die Organisation von Unternehmen existiert eine Vielzahl von Organisationsformen, die produkt- und funktionsorientierte Aufbauorganisation [EHRENSPIEL 2003], die Lightweight, Heavyweight und Autonome Projektorganisation nach CARSON SKALAK [2000] und die Matrixorganisation. Die Aufstellung von Teams richtet sich meist nach den bestehenden Organisationsformen, so werden dann z. B. aus den jeweiligen Fachabteilungen Mitglieder in die Entwicklungsteams entsandt. Diese Teams sind wie die Organisationsformen meist produktorientiert aufgebaut, funktionsorientiert heißt in diesem Zusammenhang meist gegliedert nach den verschiedenen Funktionen im Unternehmen, Entwicklung, Produktion, Vertrieb, usw. Die SE-Teams sind klassische Resultate einer solchen Teamzusammenstellung, die sich für die Entwicklung auch bewährt hat, weil sie die Kommunikation entlang der Prozesskette unterstützen. Für die Kommunikation zwischen Konstruktion und Simulation ist das SE-Team nicht die richtige Plattform, da SE-Teams nach Modulen aufgestellt werden, z. B. Sitze, Rohkarosserie, etc. Dies würde bedeuten, dass alle Berechner, die nach der Bauteil-Lastfall-Matrix Lastfälle der Sitze bzw. Rohkarosserie berechnen, Mitglieder in den SE-Teams sein müssten, was schlicht ineffizient wäre. SCHÖN [2000] schlägt Communities of Practice vor, um die Kommunikation quer zur Hierarchie und unabhängig von Organisationsformen zu verbessern. Abgeleitet davon können virtuelle Teams definiert werden, denen die äußere Organisationsform fehlt [PAHL & BEITZ 2003], die aber eine aufgabenorientierte Kommunikation pflegen können [SESSA ET AL 1999].

Diese Aufgabe, nach der Teams ausgerichtet werden, ist für das vorliegende Fallbeispiel Konstruktion und Simulation die funktionale Eigenschaft. Ergänzend zur SE-Struktur und unabhängig von bestehenden Organisationsformen werden Lastfälle und Komponenten gruppiert und zu funktionalen Einheiten zusammengefasst. Der Kerngedanke ist in Abbildung 6-1 dargestellt: die einzelnen Komponenten und Lastfälle werden gruppiert und zu sinnvollen Subsystemen zusammengefasst. Auf dieser Basis werden dann funktionale Einheiten daraus gebildet. Eigenschaftsorientierte Teams ergänzen die klassisch komponentenorientierte Sicht auf das Produkt, unterstützen die Kommunikation und den Datenaustausch und vernetzen somit die Konstruktion mit der Simulation. KREIMEYER ET AL [2006A] fordern explizit für eine stärkere Vernetzung von Konstruktion und Simulation, die Produkt- und Funktionssicht stärker zu überlagern, um die Voraussetzungen für eine Integration zu schaffen.

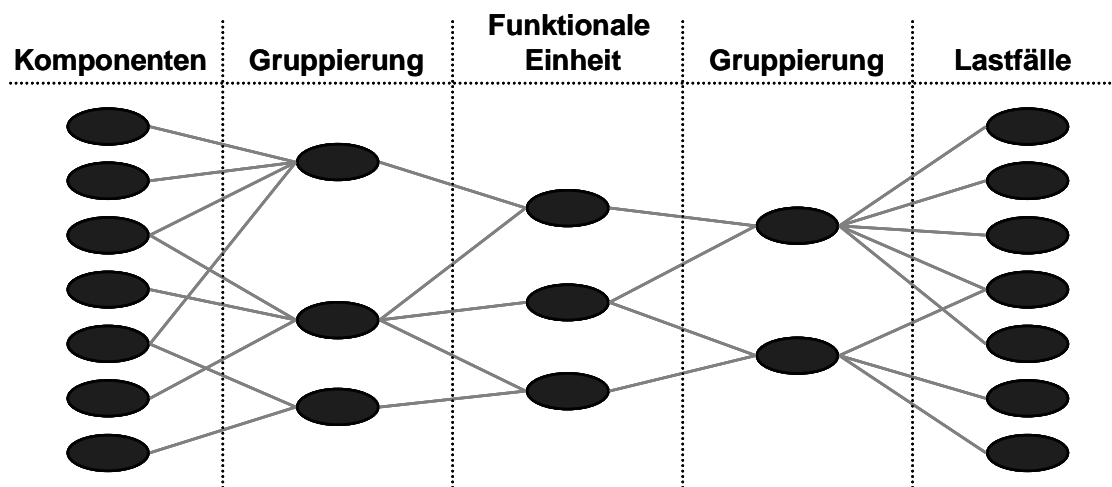


Abbildung 6-1: Vernetzung von Komponenten und Lastfällen als Basis für die Teamzusammenstellung

6.1.2 Methodik der Teamzusammenstellung für die Konstruktion und Simulation

Die Methodik der Teamzusammenstellung mit der DSM ist bereits auf andere Problemstellungen angewandt worden. KUSIAK [1999] beispielsweise stellt erst Kundenanforderungen und die geforderten Fähigkeiten der Ingenieure gegenüber und schließt in einem zweiten Schritt von den Fähigkeiten auf die potentiellen Teammitglieder. Auch NIERMEYER [2001] schlägt eine Zusammenstellung nach Fachkompetenzen vor, indem er Kompetenzen den Menschen gegenüberstellt. MCCORD & EPPINGER [1993] geben dem Austausch von Informationen den Vorrang bei der Teambildung. Dazu werden mit einer DSM die Elemente des Systems definiert, zwischen denen Informationen ausgetauscht werden müssen, sozusagen die Relation Informationsfluss besteht. Nach Rekonfiguration der Matrix können die hauptsächlich involvierten Teams bestimmt werden, wiewohl MCCORD & EPPINGER [1993] darauf hinweisen, dass für eine effektive Kommunikation innerhalb und zwischen Teams weitere Unterstützungsmethoden, wie z. B. Informationstechnologien, notwendig sind. Wie die Matrix für die Unterstützung des Informationsaustausches zwischen Konstruktion und Berechnung genutzt werden kann ist Gegenstand des Kapitels 6.2. Diese Ansätze greifen für die Bildung von virtuellen Teams in der Konstruktion und Simulation aber zu kurz. Es handelt sich um 4 verschiedene Systeme, die miteinander verknüpft werden müssen:

- Komponenten bzw. Bauteile
- Konstrukteure
- Funktionale Eigenschaften bzw. Lastfälle

- Berechner

Nachdem die Bauteil-Lastfall-Matrix bereits existiert, müssen die Komponenten den Konstrukteuren und die Berechner den Lastfällen zugeordnet werden. Das Grundprinzip der Teamzusammenstellung ist in Abbildung 6-2 dargestellt: der erste Schritt ist die Bauteil-Lastfall-Matrix, von der sich sowohl die Zuordnung von Bauteilen zu Konstrukteuren als auch die von Berechnern zu Lastfällen ableitet. Dabei werden nicht die Mitarbeiter namentlich benannt, sondern es werden Funktionen bzw. Kompetenzen, z. B. Konstruktion Sitz, aufgeführt. Auf diese Weise sind eine Wiederverwendbarkeit, eine Verallgemeinerbarkeit der Methode und eine gewisse Anonymität für eine Umsetzung in der Praxis gewährleistet. Da in einem Team nicht alle Mitglieder dieselbe Rolle haben, müssen die Zuordnungen zwischen Konstrukteuren und Bauteilen bzw. Berechnern und Lastfällen gewichtet erfolgen. Als Gewichtung werden drei Stufen über Zahlenwerte definiert⁴⁹: Beratung mit geringer Interaktion (1), Ausarbeitung mit mittlerer Interaktion (2) und Verantwortung mit hoher Interaktion (3). Ein Teamzusammenstellungsalgorithmus durchläuft die Zellen der Lastfall-Bauteil-Matrix und entnimmt dabei die Gewichtung sowie das aktuelle Bauteil und den aktuellen Lastfall. Dann wechselt der Algorithmus in die Bauteil-Konstrukteurs-Matrix und erfasst die Konstrukteure, die mit dem Bauteil zu tun haben, wobei die einzelnen Rollengewichtungen erfasst werden. Diese Prozedur wird für die Lastfall-Berechner-Matrix wiederholt. Der dritte Schritt besteht aus der Bildung einer Matrix, in der die Konstrukteure und Berechner, die in die aktuelle Bauteil-Lastfall-Paarung involviert sind, gegenübergestellt werden. Der Interaktionswert zwischen Konstrukteur und Berechner ergibt sich aus der Multiplikation der drei Gewichtungen aus den drei Matrizen und der Summation dieses Wertes mit allen Interaktionswerten, um so Datenverluste zu vermeiden. Damit kann die Konstrukteur-Berechner-Matrix komplett gefüllt werden. Durch Aufsummieren von Spalten und Zeilen, vgl. dazu Kapitel 5.2, kann eine Rangliste gebildet werden, aus der dann ein Team zusammengestellt werden kann, je höher die Summe der Interaktionswerte, desto höher die Gewichtung und damit die Bedeutung und daraus folgend die Rolle im Team. Resultat sind eigenschaftsorientierte Teams in verschiedener Besetzung, die sich selbstverständlich überschneiden können, d. h. ein Konstrukteur bzw. ein Berechner kann Mitglied in unterschiedlichen Teams sein.

⁴⁹ Es gibt wesentlich differenziertere Definitionen von Rollen, die nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind. Sie ließen sich aber problemlos über Zahlenwerte mit der Einflussmatrix abbilden, wie in Kapitel 5.2 gezeigt wurde.

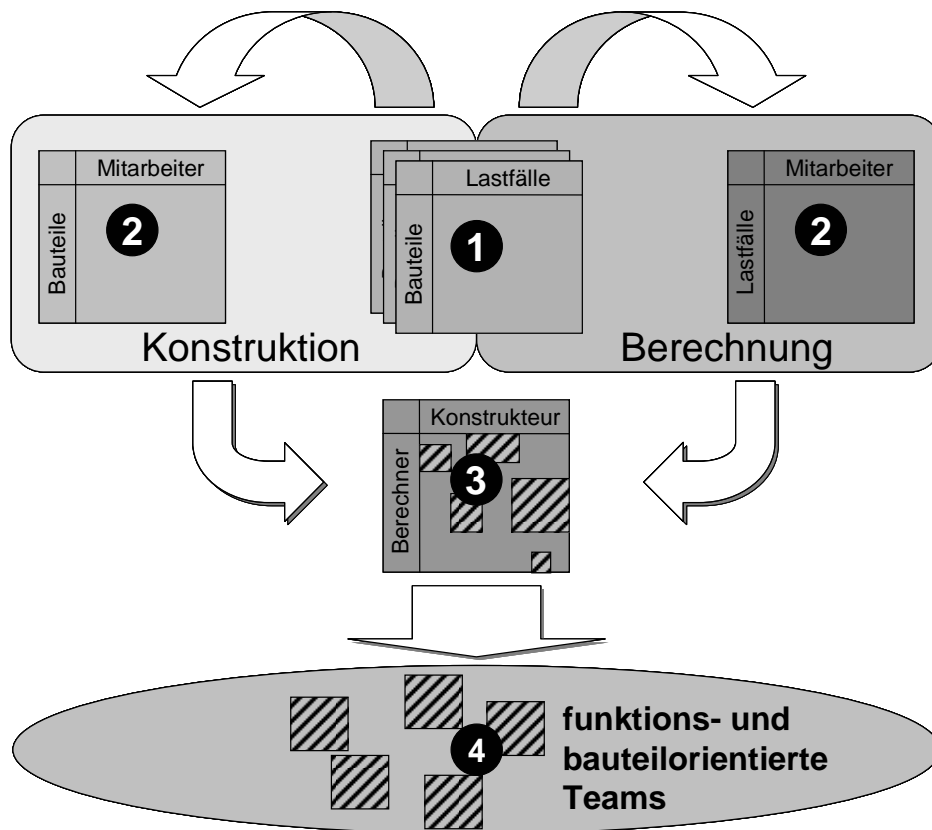


Abbildung 6-2: Zusammenstellung von funktions- und eigenschaftsorientierten Teams

Der gezeigte Weg, zu eigenschaftsorientierten Teams für eine verstärkte Integration von Konstruktion und Simulation zu gelangen, ist zuerst aufwendig, da die Matrizen zusammengestellt werden müssen, Stellen für Konstruktion und Simulation beschrieben werden und schließlich Gewichtungen definiert werden müssen. Gleichwohl ist das ein einmaliger Vorgang, die Matrizen und der dazu programmierte Algorithmus können für jedes Entwicklungsprojekt eingesetzt werden. Eine Anwendung der Methode in der Praxis lieferte bereits ein positives Ergebnis, die Teamzusammenstellung des Algorithmus entsprach den Erwartungen und lieferte eine Beschreibung der Relationen der Konstrukteure und Berechner untereinander. Dennoch gilt es zu betonen, dass eine Methode der Teamzusammenstellung gefunden wurde, nicht der Teambildung. Der Weg zu einer Teambildung führt schließlich über z. B. eine gemeinsame Zielvereinbarung als Basis für die Zusammenarbeit, Akzeptanz und Vertrauen und nicht zuletzt die Unterstützung der Informationstechnik. Über die Bildung und Phasen von Teams sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen, vgl. NIERMEYER [2001], LINDEMANN [2007] bzw. EHRENSPIEL [2003]. Entscheidender Vorteil von Teams ist in jedem Fall die Möglichkeit des geregelten Daten- und Informationsaustausches zwischen den Mitgliedern, auf den im Folgenden eingegangen wird.

6.2 Die Bauteil-Lastfall-Matrix zur gezielten Filterung von Informationen

Im Kapitel 4 wurde gezeigt, dass Kommunikation in Form der Weitergabe und dem Empfang von Informationen ein wichtiger Faktor für die Integration von Konstruktion und Simulation ein. Das im folgenden Abschnitt vorgeschlagene Konzept ordnet sich in das Problemsystem nach Abbildung 3-16 in die Verknüpfung der Dimensionen Produkt und Daten ein. Es soll das Konzept der Informationsbausteine als Formalisierung der Informationen aus Kapitel wieder aufgenommen werden und in den Kontext einer Verknüpfung von Komponenten und Eigenschaften gestellt werden.

6.2.1 Theoretisches Konzept

Wesentliche Faktoren für ein effizientes Informationsmanagement für die Konstruktion und Simulation sind [HERFELD ET AL 2006]:

- Steuerung des Informationsaustausches durch die gezielte Adressierung der beteiligten Konstrukteure und Berechner
- Regelung der Datenzugriffe und –filterung durch die Identifikation eindeutiger und sinnvoller Abhängigkeiten
- Ableitung einer Infrastruktur zur Datenhaltung, die den identifizierten Bedürfnissen entspricht

Ein wichtiger Vorteil der Bauteil-Lastfall-Matrix ist die Möglichkeit, Abhängigkeiten darzustellen und nach bestimmten Kriterien, seien es Bauteile oder Lastfälle, zu filtern, wie bereits in Kapitel 5.3.2 erörtert. Dadurch kann der einzelne Konstrukteur schnell feststellen, von welchen Lastfällen sein Bauteil betroffen ist bzw. der Berechner kann schnell die für die Simulationsmodelle benötigten Umfänge filtern. Dieser Ansatz lässt sich noch ausbauen, indem die Felder der Matrix bzw. bestimmte Cluster mit den notwendigen Informationen in beide Richtungen ergänzt werden. DÜCHTING [2005] legt hier ein Konzept vor, die Einflussmatrix mit weiteren Informationen, in seinem Beispiel mit Freigabeverantwortlichkeiten, zu füllen und somit ein effizienteres Freigabeassistenzsystem aufzubauen. In Kapitel 4.3.3 wurden Informationsbausteine für die Konstruktion und Simulation entwickelt, die im folgenden Abschnitt mit der Matrix gekoppelt werden sollen, und so einen definierten Daten- und Informationsaustausche zwischen Konstruktion und Simulation ermöglichen. Auch hier kann eine Verknüpfung von Komponenten und Funktionen in Form der Bauteil-Lastfall-Matrix einen Beitrag leisten. Das Grundkonzept ist in Abbildung 6-3 dargestellt: die vorhandenen Informationen der Komponenten sollen mit den vorhandenen Informationen über die Lastfälle mithilfe der Matrix verknüpft werden. Die Matrix in Abbildung 6-3 ist bereits strukturiert und nach der Zusammengehörigkeit von Bauteilen und Lastfällen geordnet. Über die Lastfälle werden die Berechner identifiziert und über die Bauteile die betroffenen Konstrukteure. Zur Übersetzung von den Lastfällen zu den Berechnern bzw. den Bauteilen zu den Konstrukteuren können wieder die aus Kapitel 6.1 bekannten Berechner-Lastfall bzw. Bauteil Konstrukteur-

Matrizen verwendet werden. Die Cluster können als Informationsbausteine aufgefasst werden. Diese existieren in zwei Ausprägungen, je nachdem in welche Richtung die Informationen fließen sollen.

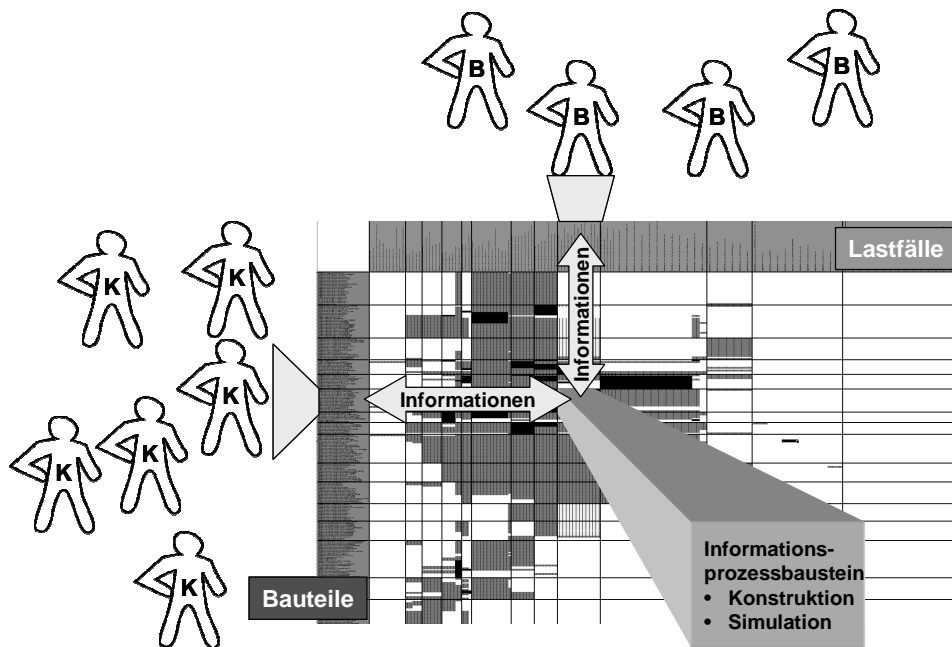


Abbildung 6-3: Grundkonzept zur Nutzung der Matrix für den wechselseitigen Informationsfluss zwischen Konstruktion(K) und Berechnung (B)

6.2.2 Informationsbausteine in der Bauteil-Lastfall-Matrix

Wie gezeigt enthält die Matrix sowohl Baugruppen als auch Einzelteile, je nachdem, wie stark sie in die Lastfälle involviert sind. Die in Kapitel 4.3.3 definierten Informationsbausteine müssen für das Konzept weiter verfeinert werden. Die Informationen, die in den Bausteinen enthalten sind, lassen sich in vier Kategorien einteilen:

- Bauteilinformationen, z. B. Geometrie, Schwerpunkt, etc.
- Baugruppeninformationen (Struktur): Verbindungstechnik, Strukturinformationen, etc.
- Gemeinsame Informationen für Bauteile und Baugruppen (Basisinformationen): Version, Anforderungen, etc.
- Lastfallspezifika: Lasten, Standardkomponenten, etc.

Fasst man einen Informationsbaustein als homogenes Gebilde auf, das Komponenten und Lastfälle zu einer Gruppe zusammenfasst, so kann ein wesentlicher Vorteil von Matrizen, ihre

Linearität, ausgenutzt werden. Dadurch lassen sich die enthaltenen Informationen hierarchisieren, nach übergeordneten Informationen, beispielsweise die Strukturinformationen und nach Bauteilinformationen eine Hierarchieebene tiefer. Die Matrix auf der obersten Ebene, der Ebene des Gesamtfahrzeugs, umfasst die Komponenten und Eigenschaften. Durch die Neustrukturierung der Matrix bilden sich Cluster heraus, die Eigenschafts- bzw. Lastfallgruppen und die dazu gehörigen Komponenten (funktionale Baugruppe) enthalten. Die in der Matrix gebildeten Cluster sind nach Eigenschaften geordnet, so dass eine Gruppe von Simulationen die im Cluster enthaltenen Komponenten benötigt werden. Zu den Komponenten auf der Ebene des Gesamtprodukts gehören die Baugruppeninformationen. Durch die Linearität der Matrix kann der Cluster als Matrix eine Ebene darunter aufgefasst werden, die die einzelnen Bauteile enthält. Den Feldern in dieser Matrix werden die Bauteilinformationen zugeordnet. Das Konzept ist in Abbildung 6-4 dargestellt, die Hierarchieebenen lassen sich, wie bereits erwähnt, beliebig und soweit sinnvoll erweitern.

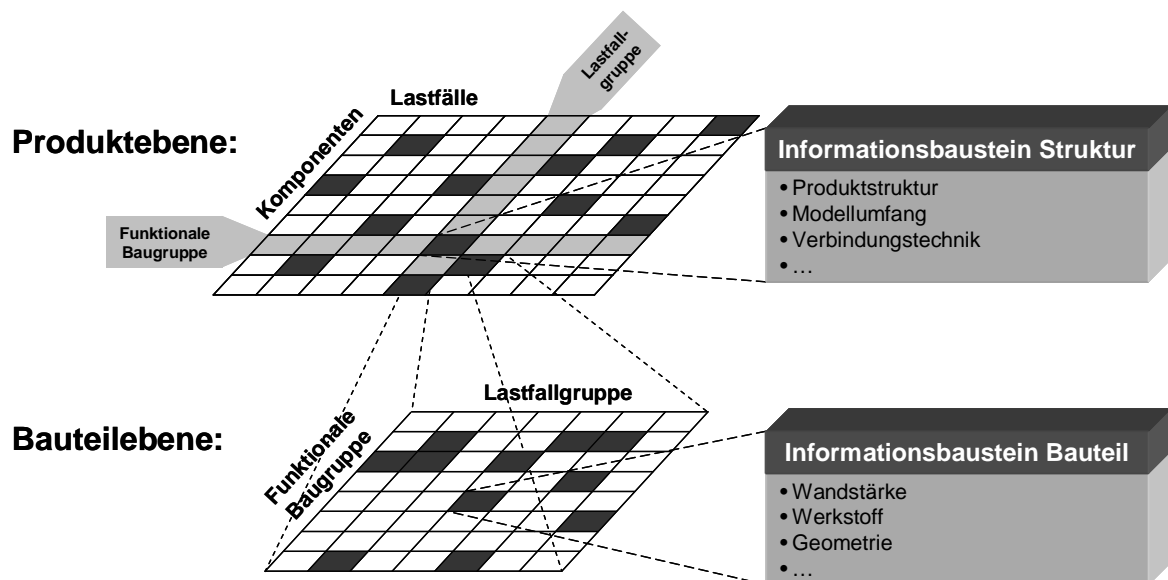


Abbildung 6-4: Hierarchische Informationsstrukturierung mit der Bauteil-Lastfall-Matrix

Voraussetzung für die Umsetzung des Konzepts ist die Anreicherung der Matrix mit weiteren Informationen. Bislang sind in der Matrix nur die Informationen über die Relationen zwischen Bauteilen und Lastfällen enthalten. Als weitere Information sind Cluster enthalten, also Gruppierungen in der restrukturierten Matrix, denen sich eine Komponenten-Lastfall-Kombinationen zuordnen lassen. Dies sind folglich Komponenten bzw. Lastfälle, die zueinander in Beziehung stehen, die also auch über gemeinsame Informationen bzw. über eine gemeinsame Datenbasis verfügen. Damit lassen sich die Informationsbausteine aufteilen: übergeordnete Strukturinformationen auf Ebene der Cluster, Komponenteninformationen in den einzelnen Zellen der Matrix.

6.2.3 Ausblick auf die Umsetzung

Die zur Beschreibung eines Systems benötigte Informationsmenge wächst mit dessen Komplexität [GÖPFERT 1998], so dass die Menge an Informationen, die in der Entwicklung komplexer Produkte wie einem Automobil anfallen, für den einzelnen Konstrukteur bzw. Berechner nicht mehr zu beherrschen ist. Dies gilt selbst für Informationen, die für das unmittelbare Arbeitsergebnis des Ingenieurs notwendig sind. Die Notwendigkeit des regelmäßigen Informationsaustausches, vor allem in großen Entwicklungsteams wird von ULRICH & EPPINGER [2000] daher explizit betont. Sie schlagen als Unterstützung des Informationsflusses die durch die DSM identifizierten einzelnen Entwicklungsteams vor. Gleichzeitig fordern sie intensive IT-Unterstützung für die notwendigen Informationsflüsse. Problem ist und bleibt dabei die extrem heterogene IT-Systemlandschaft in den meisten größeren Unternehmen, deren Schnittstellen- und Datenverluste durch manuelle Nacharbeit bzw. intensive Recherche ausgeglichen werden müssen [MARKWORTH 2003]. Das Konzept der Bauteil-Lastfall-Matrix als Verbindungselement zwischen zwei Systemen und damit auch zwei Sichten auf das Produkt, der der Konstrukteure und der der Berechner, kann in eine IT-Systemlandschaft eingebunden, hier einen Beitrag leisten, um Informationen durchgängig zur Verfügung zu stellen bzw. sich die Informationen und Daten effizient und zeitsparend zu besorgen. Dabei gilt es zu beachten, dass die für die Konstruktion und Simulation benötigten Daten und Informationen meist vorhanden sind, nur eben unstrukturiert, schwer zugänglich und in getrennten Systemen gespeichert werden.

Die Lastfall-Bauteil-Matrix kann nun, wie in Abbildung 6-5 dargestellt, eine Verknüpfung zwischen einem Konstruktions- und Simulations-PDM darstellen und die Filterung, Speicherung und gezielte Weitergabe von den relevanten Informationen übernehmen. Stellt beispielsweise ein Konstrukteur ein neues Bauteil in das PDM-System ein, können über die Filterung der Lastfall-Bauteil-Matrix genau die Berechner adressiert werden, die das Teil für ihre Simulationen benötigen und dann selbst entscheiden, ob sie ihr Modell aktualisieren müssen oder nicht. Umgekehrt können die Konstrukteure gezielt über die Ergebnisse aus den Simulationen informiert werden, hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass nur die für den Konstrukteur verwertbaren Ergebnisse weitergegeben werden, komplette Berechnungsreports sind meist zu umfangreich und nur von Spezialisten auswertbar und interpretierbar.

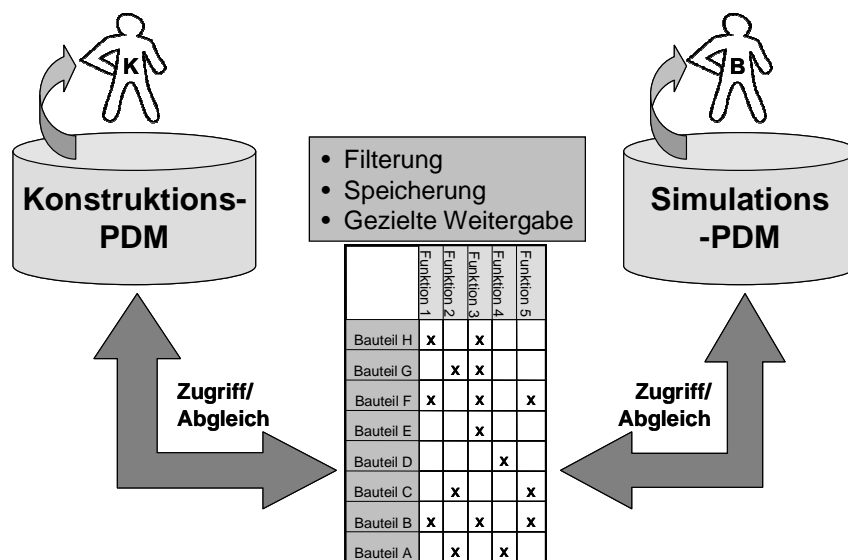


Abbildung 6-5: Die Bauteil-Lastfall-Matrix als Informationsdrehscheibe zwischen Konstruktion (K) und Berechnung (B) [HERFELD ET AL 2006]

Eine weitere Anwendung ist die Erleichterung beim Aufbau eines Simulationsmodells, für das wie in Kapitel 4.3 gezeigt eine Fülle von Daten und Informationen notwendig sind. Voraussetzung für die Umsetzung der Konzepte sind intelligente Workflowkonzepte, z. B. automatisierte Benachrichtigungen via Email, etc. und eine Einbindung in die IT-Landschaft des Unternehmens. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass aber reine IT-Konzepte und -Lösungen allein eine nachhaltige und effiziente Vernetzung zwischen Konstruktion und Simulation nicht erreichen werden, der persönliche Kontakt ist nach wie vor durch nichts zu ersetzen, die IT schafft aber die infrastrukturellen Voraussetzungen dafür [HERFELD ET AL 2006]. Die Ergebnisse aus den in Kapitel 3.1 dargestellten Anwenderstudien zur Kommunikation und Kollaboration zwischen Konstruktion und Simulation belegen dies eindeutig dadurch, dass Faktoren wie gemeinsame Ziele und Wissen um die Informationsbedürfnisse des jeweiligen Prozesspartners ganz entscheidend sind für eine Effizienzsteigerung.

6.3 Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Bauteil-Lastfall-Matrix

Die im folgenden Kapitel aufgezeigten Anwendungs- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Bauteil-Lastfall-Matrix sind ausschließlich als Möglichkeiten zu verstehen. Es werden Theorien und Szenarien entworfen, die nur teilweise in Anwendungsfälle umgesetzt worden sind, die aber deutlich machen, dass aus Sicht des Autors durch die Verknüpfung von Komponenten und funktionalen Eigenschaften noch ein sehr großes Potential hinsichtlich der Integration von Konstruktion und Simulation besteht. Die Ansätze ordnen sich nach dem Prob-

lemssystem aus Abbildung 3-16 in die Verknüpfung der Dimensionen Produkt und Daten und Produkt und Prozess ein.

6.3.1 Erweiterung der Matrix auf Subsystemebene

Grundproblem in der Entwicklung von komplexen Produkten ist die Tatsache, dass sich Eigenschaften und Funktionen wechselseitig über alle Ebenen der Produktstruktur hinweg beeinflussen, wie in Kapitel 5 gezeigt wurde. Die Bauteil-Lastfall-Matrix wurde in einem ersten Entwurf nur für Lastfälle auf den oberen Ebenen der Produktstruktur entwickelt, es ist aber besonders wichtig, die in Abbildung 2-2 dargestellten Wechselwirkungen zwischen lokalen und globalen Eigenschaften herauszuarbeiten. Es ist vor allem für den Konstrukteur wichtig, nicht nur die Anforderungen zu berücksichtigen, die von der numerischen Simulation abgedeckt werden können, sondern sämtliche weiteren Anforderungen, die entweder nicht simuliert werden können oder die mit anderen Methoden der Eigenschaftserkennung entwickelt werden. Dies kann über die Relationen in der Bauteil-Lastfall-Matrix erfolgen, sofern die Matrix dazu um die relevanten Bauteile und die lokalen Lastfälle bzw. Anforderungen erweitert wird. Es ist aber einleuchtend, dass eine derart große Matrix nicht mehr sinnvoll beherrschbar ist. Daher kann auch hier die Linearität von Matrizen ausgenutzt werden und Subsysteme gebildet werden, wie in Kapitel 6.2.2 gezeigt. Die Subsysteme können beispielsweise nach der Produktstruktur ausgewählt werden, bei einem Fahrzeug z. B. Sitz, Cockpit, Tür, etc.

Aus diesem Zwang – Beherrschbarkeit der Verknüpfungsmatrix auf der einen Seite, Beherrschung der Komplexität der Anforderungen und Bauteile auf der anderen – werden daher Matrizen für lokale Probleme entwickelt, die der Bauteil-Lastfall-Matrix praktisch vorgeschaltet ist. Somit können kritische Anforderungen und Bauteile auf Subsystemebene identifiziert werden und nur die in den kritischen Clustern enthaltenen Anforderungen und Bauteile werden in die globale Bauteil-Lastfall-Matrix übernommen. Dies erfordert auf Subsystemebene die Erstellung einer Einflussmatrix bzgl. der Anforderungen und einer Einflussmatrix Komponenten zu Anforderungen. Eine solche Einflussmatrix ist in Abbildung 6-6 dargestellt, in der am Beispiel einer Fahrzeugtür Bauteile und Anforderungen verknüpft sind. Die dazu erstellte Software ist einfach und intuitiv bedienbar. In einem ersten Schritt können Bauteile und Anforderungen eingetragen werden, die sich aber auch als Text-Dateien aus anderen Systemen, z. B. Datenbanken, importieren lassen⁵⁰. Die Verknüpfungen werden dann manuell in die Matrix eintragen. Ein Algorithmus bildet durch Vertauschen von Zeilen und Spalten, die ja den Inhalt der Matrix nicht beeinflusst, Cluster, nach denen entweder Arbeitspakete gebildet werden können (nach denen dann auch Teams ausgerichtet werden können) oder kritische Elemente identifiziert werden können. Die Bauteil-Anforderungsmatrix auf Subsystemebene lässt sich beispielsweise für Freigabeprozesse anwenden. Für den Konstrukteur ist es schwierig, sämtliche Anforderungen, die seine Komponente zu erfüllen hat, zu überblicken und zu beherrschen. Die Bauteil-Anforderungs-Matrix lässt sich als eine Art Checkliste für Freigaben

⁵⁰ Für die Automatisierung und die Einbindung der Matrix-Methode in Workflows ist beispielsweise denkbar, sich die Produktstruktur aus dem CAD und die Anforderungen aus Lastenheftmanagementsystemen, z. B. Doors, ausgeben zu lassen.

verwenden. Stehen Freigaben von Bauteilen an, d. h. müssen z. B. Fertigungsanlagen bestellt oder Werkzeuge hergestellt werden, so kann der Konstrukteur über die Matrix erkennen, welche Anforderungen erfüllt werden müssen und das im Kontext der Baugruppen. Kritische Bauteile, die einen hohen Einfluss auf die Anforderungen haben, müssen dann in die Bauteil-Lastfall-Matrix auf Gesamtfahrzeugebene aufgenommen werden.

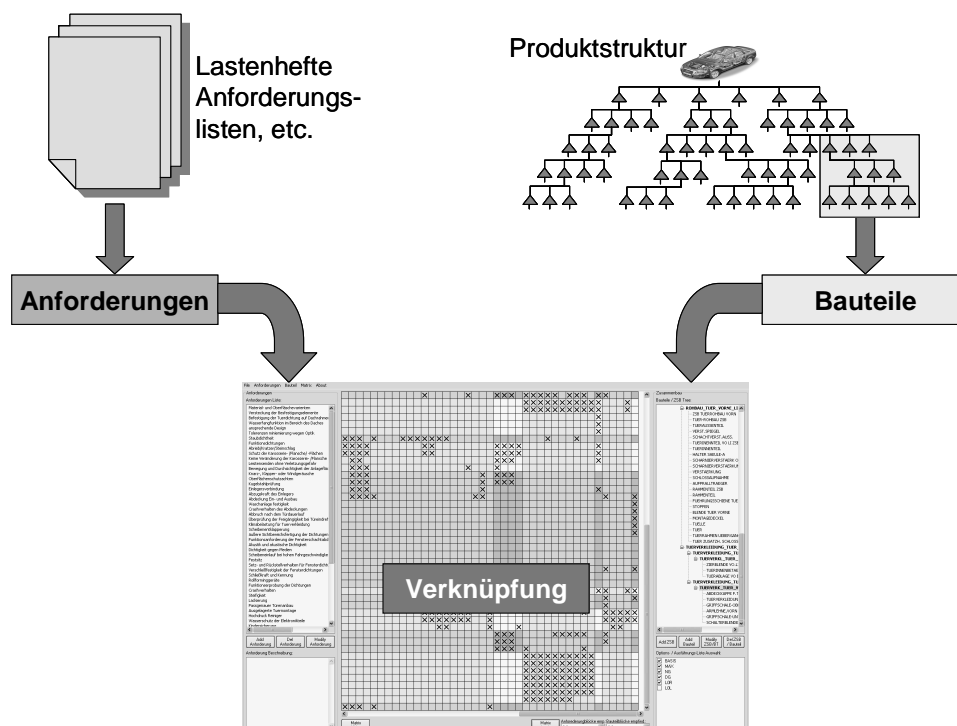


Abbildung 6-6: Einflussmatrix auf Subsystemebene für Bauteile und Anforderungen

6.3.2 Unterstützung im Modellaufbau der numerischen Simulation

Die Relation zwischen den Bauteilen und den Lastfällen in der Bauteil-Lastfall-Matrix bildet den Einfluss von Bauteilen auf die Erfüllung von funktionalen Eigenschaften ab. Erstellunggrundlage der Matrix sind daher u. a. die Bauteile, mit denen die verschiedenen Simulationsmodelle aufgebaut sind. Im Umkehrschluss lässt sich die Matrix demzufolge nutzen, um Simulationsmodelle aufzubauen. Die aus den CAD-Daten generierten vernetzten Bauteile werden zu Submodellen, so genannten Includes, zusammengefasst, die wiederum zu Input-Decks, die an den Solver geschickt werden, zusammengefasst werden. Diese Zusammenfassung auf der CAE-Seite entspricht in den seltensten Fällen der Produktstrukturierung auf der CAD-Seite, die Modellstrukturen von Konstruktion und Simulation passen nicht zusammen [KRSTEL & MERKT 2002]. Der prinzipielle Zusammenhang und damit die Unvereinbarkeit

der Modellstrukturen⁵¹ ist in Abbildung 6-7 dargestellt. An den Bauteilen hängen die Dokumente in Form von CAD-, CAE- Daten und Netzen (ergänzt durch nicht-geometrische Daten und Metadaten). Aus den Netzen werden die Submodelle mit den Includes erstellt, die dann zu Rechenmodelle zusammengefasst werden. Dabei können die Includes aus unterschiedlichen Bauteilen bestehen und die Input-Decks aus verschiedenen Includes, je nach Lastfall. Auch hier wird die Relation zwischen Bauteilen und Lastfällen deutlich, ohne deren Strukturierung die notwendige Transparenz nicht gewährleistet werden kann.

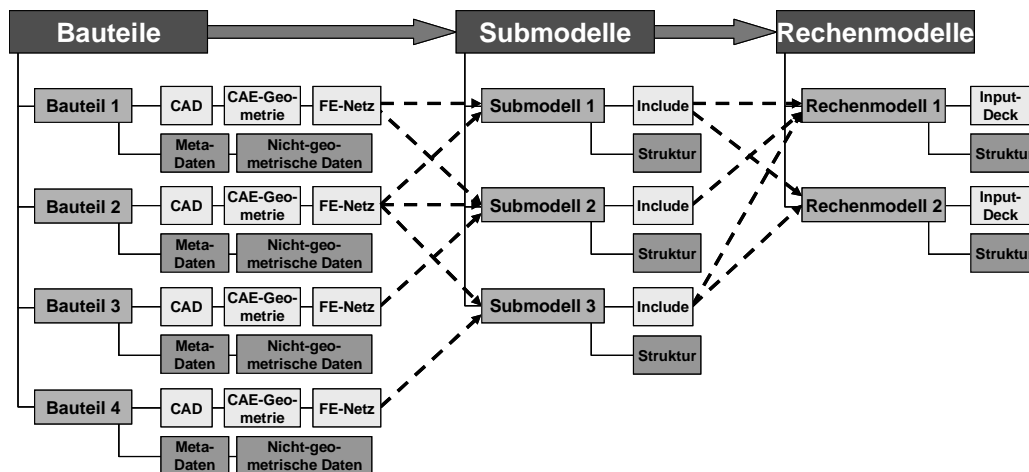


Abbildung 6-7: Produktstruktur und CAE-Modellstruktur

Mit den Rechenmodellen werden die definierten Lastfälle berechnet, so dass hier der Zusammenhang zwischen Bauteilen und Lastfällen wieder sichtbar wird. Die Lastfall-Bauteil-Matrix bzw. im weiteren Sinne der Zusammenhang zwischen Komponenten und Eigenschaften, die sich dann in dem Zusammenhang Bauteile und Rechenmodell wieder finden, kann auch hier genutzt werden, um Verbesserungen im Berechnungsprozess zu erreichen. Eine zentrale Anforderung an ein Datenmanagementsystem für die Simulation ist die Verknüpfung der Modell- mit der Dokumentstruktur, das heißt Teile – Submodelle – Rechenmodelle mit den Dokumenten CAD-Modell – CAE-Geometrie – und FE-Netz. Dazu wird ein Workflow mit Unterstützung der Verknüpfungsmatrix vorgeschlagen, der in Abbildung 6-8 skizziert ist.

⁵¹ Die Modellstruktur ist nicht zu verwechseln mit der Produkt- und Eigenschaftsstruktur aus dem Kapitel 5, es geht bei der Modellstruktur um die Abbildung der CAD- und CAE-Daten. Gleichwohl finden sich auch hier die hierarchische, bauteilorientierte Produktstrukturierung im CAD und die lastfall- und funktionsorientierte Struktur im CAE wieder [KRASTEL 2001].

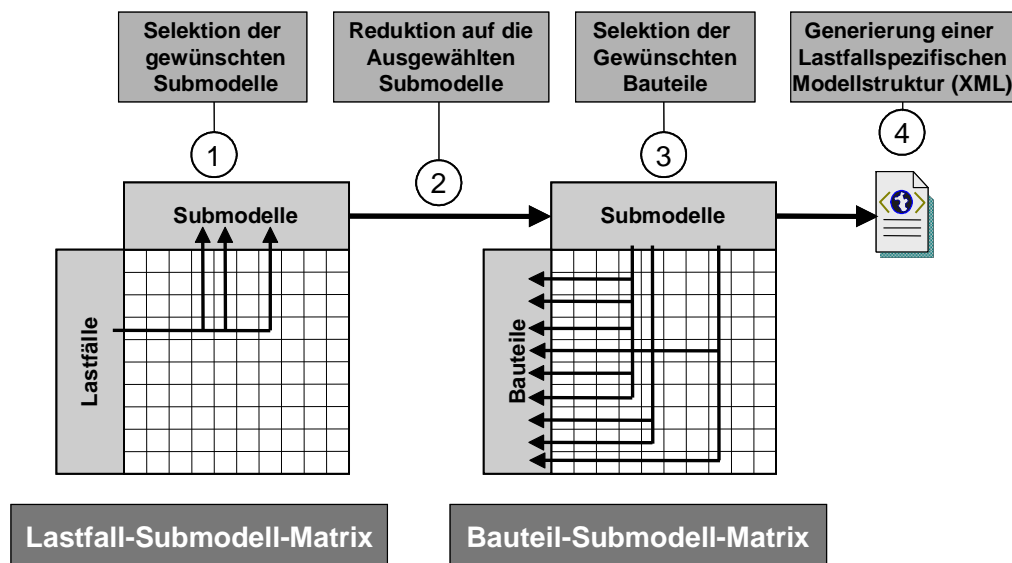


Abbildung 6-8: Workflow zur Konfiguration der Modellstruktur

In einem ersten Schritt werden die Lastfälle den Submodellen zugeordnet, d. h. welche Include-Dateien für welchen Lastfall notwendig sind. Die Submodelle werden somit den Lastfällen zugeordnet. In einem zweiten Schritt werden die Umfänge der Submodelle reduziert, dazu wird die Bauteil-Submodell-Matrix benötigt. Den Submodellen werden hier die entsprechenden Bauteile zugeordnet, um mehrdeutige Zuordnungen zu vermeiden und die richtigen Bauteile für die gewünschten Lastfälle zu selektieren. Abgeleitet wird daraus eine lastfallspezifische Modellstruktur, die z. B. als XML- oder STEP-Datei verwendet werden kann. Eine Umsetzung des Konzepts ist in Abbildung 6-9 gezeigt. Das Konzept wird exemplarisch an einem Beispiel skizziert. Wie aus der Lastfall-Submodell-Matrix erkennbar wird, können einige Submodelle (z. B. Submodell 3) nicht ausgewählt werden. Damit wird bereits eine Vorgabe bzgl. des Aufbauzustandes des Modells gemacht. So sind für bestimmte Lastfälle im NVH unterschiedliche Aufbauzustände erforderlich (Rohkarosserie, Trimmed Body, Gesamtfahrzeug). Wird etwa ein Lastfall betrachtet, für den ein Trimmed Body benötigt wird, können die Submodelle, die das Fahrwerk beschreiben, nicht ausgewählt werden. Optional können die Submodelle selektiert werden, die nicht zwingend für diesen Lastfall erforderlich sind, aber bei Bedarf ausgewählt werden können. Nach der entsprechenden Auswahl, in diesem Fall die Selektion der Submodelle 1 und 2 sowie 4 und 5, reduziert sich die Ansicht auf die gewählten Submodelle und den dazugehörigen Bauteilen. Die Angaben zur Repräsentationsform (FE-Netz, NSM, Punktmasse etc.) sind an dieser Stelle von rein informativer Natur, um einen transparenten Blick auf die gängige Praxis bei der Rechenmodellerstellung zu geben.

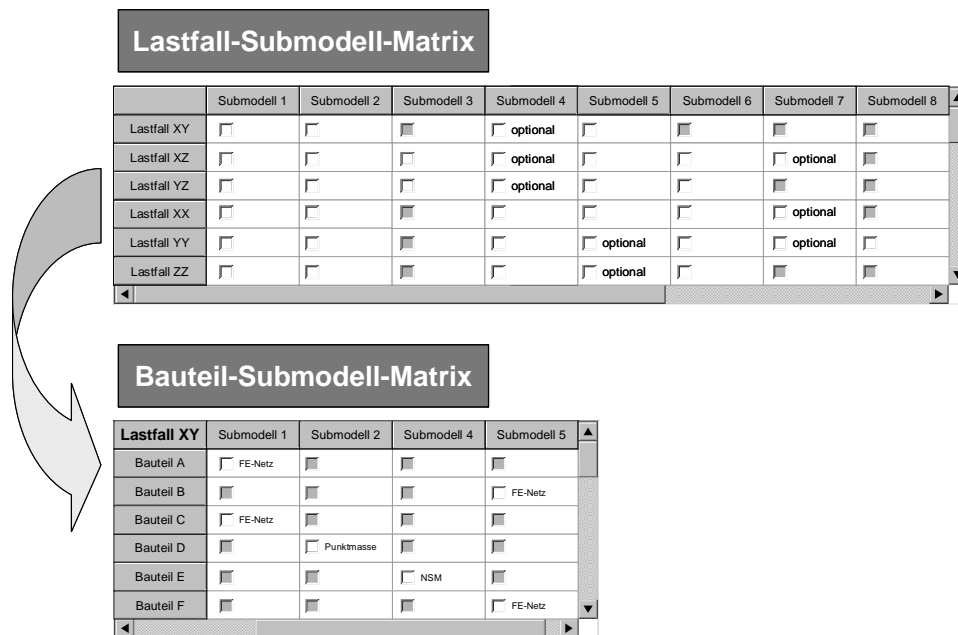


Abbildung 6-9: Beispielhafte Umsetzung der Konfigurationsmatrizen

Wie in der Matrix zuvor, sind hier ebenfalls einige Auswahlmöglichkeiten inaktiv, was an der Standardisierung auf eine generische Modellstruktur mit eindeutiger Zuordnung der Bauteile zu Submodellen liegt. Dabei wird deutlich, dass die Zuordnung der Teile zu bestimmten Submodellen exklusiv ist. Das heißt, dass das Bauteil nicht mehrfach mehreren Submodellen zugeordnet werden kann. Generell wäre es durchaus möglich, eine mehrdeutige Zuordnung zu schaffen. Beispielhaft lassen sich die Submodelle der Interieurteile heranziehen. Die Summe der Interieurteile könnte einem Submodell „Interieur“ zugeordnet werden, das für Frontcrashanalysen verwendet wird. Für die genauere Analyse in der Disziplin Occupant Safety ist aus praktischen Gründen eventuell eine Unterteilung in ein Submodell für die Cockpit-Teile, ein Submodell für die Verkleidungsteile der Tür und ein Submodell für die Dachverkleidung (Greenhouse) sinnvoll. Ein spezifisches Teil würde damit mehreren Submodellen zugewiesen werden.

6.3.3 Dynamisierung

Produktentwicklung ist ein hochdynamischer Prozess, in dessen Verlauf sich Aufgaben, Anforderungen und Schnittstellen ständig ändern. Die Einflussmatrix ist aber nur eine statische Momentaufnahme, so dass die Analysen mit Einflussmatrizen im Entwicklungsverlauf kontinuierlich wiederholt werden müssen [DANILOVIC & SANDKULL 2005]. Das Ergebnis sind dennoch nur Momentaufnahmen von Zuständen zu bestimmten Zeitpunkten im Prozess. Stellt man die Einflussmatrix von Komponenten und funktionalen Eigenschaften für eine Konzeptphase eines Entwicklungsprojektes auf, so ergibt sich ein völlig anderes Bild als in der Se-

rienentwicklung. Die Matrix ist auf wenige, zentrale Komponenten und funktionale Eigenschaften beschränkt, was vor allem der Tatsache geschuldet ist, dass es meist noch keine detaillierten Datenstände der Komponenten gibt. In der Serienentwicklung steigen die Anzahl der betrachteten Lastfälle und die Zahl der als CAD-Daten zur Verfügung stehenden Komponenten stark an, so dass die Matrix erheblich größer wird. Eine Methode, die Einflussmatrix zeitlich abhängig als Funktion der Zeit darzustellen, existiert nach derzeitigem Forschungsstand noch nicht.

Die Problematik der Abbildung zeitlicher Abhängigkeit mit der Einflussmatrix trifft jedoch auf die Bauteil-Lastfall-Matrix nur bedingt zu. Dies liegt daran, dass sich die Relationen innerhalb der Matrix praktisch nicht ändern. Gehr man davon aus, dass Anforderungen⁵² über die Entwicklungslaufzeit konstant sind und das Produkt, in diesem Fall das Fahrzeug, sich zwar in seiner geometrischen Ausprägung, nicht aber in seiner prinzipiellen Produktstruktur⁵³ ändert, so sind die beiden Systeme von Beginn an im Prinzip konstant. Was sich ändert ist die Zahl der Relationen, die mit dem Entwicklungsfortschritt wächst. Daraus folgt, dass die Matrix mit dem Entwicklungsfortschritt mitwachsen kann, d. h. die Relationen müssen entweder zu definierten Meilensteinen oder kontinuierlich ergänzt werden. Dies hat zwei Vorteile: der Entwickler, ob aus der Konstruktion oder der Simulation, muss sich den Einflusses immer wieder bewusst machen und prüfen, ob neu hinzugekommene Lastfälle bzw. Bauteile Auswirkungen haben, und zweitens lässt sich der Entwicklungsfortschritt hinsichtlich einer funktionsorientierten Entwicklung dokumentieren.

6.4 Kritische Bewertung und Reflexion der Bauteil-Lastfall-Matrix

Es konnte gezeigt werden, dass das Konzept der Verknüpfungsmatrix, die in Form der Bauteil-Lastfall-Matrix umgesetzt wurde, vielfältige Möglichkeiten bietet, um die Integration von Konstruktion und Simulation zu verbessern. Wichtig ist zu zeigen, dass die Verknüpfung von Komponenten und Eigenschaften die verschiedenen Sichten von Konstruktion und Berechnung auf das Produkt vereint und hier noch ein hohes Potential für Prozessverbesserungen sowohl zwischen Konstruktion und Simulation als auch innerhalb der Disziplinen, etwa bei der Konfiguration der Modellstruktur existiert. Gleichwohl gibt es auch einige Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Verknüpfung von Komponenten und Funktionen, die an dieser Stelle diskutiert werden.

⁵² Das ist zwar in der Regel nicht der Fall, weil sich im Verlaufe der Entwicklung durch Wettbewerbsdruck, sich ändernde gesetzliche Rahmenbedingungen, etc. auch die Anforderungen ändern, dies sei aber vernachlässigt, da diese Thematik mehr in den Bereich des Anforderungsmanagements gehört und sich nicht mit einer Einflussmatrix abbilden lässt. Abbilden lässt sich aber, welche Konsequenzen neu hinzugekommene Anforderungen auf das Gefüge Bauteil-Lastfälle haben können.

⁵³ Auch dies stimmt nur bis zu einem gewissen Detaillierungsgrad. Auf der untersten Ebene der Produktstruktur mit den einzelnen Bauteilen im Fahrzeug ist eine Änderung der Struktur – Stichwort Integral- oder Differentialbauweise [EHRENSPIEL 2003] – bis weit in die Serienentwicklung hinein möglich, siehe dazu Kapitel 6.4.

- **Übersichtlichkeit:** die Matrix hat in einem ersten Entwurf bei der Berücksichtigung von 4 Lastfallkategorien, NVH, Crash, Insassen- und Fußgängerschutz bereits ca. 52.000 Felder. Durch die Programmierung von Filtern lassen sich zwar Teilbereiche der Matrix ausblenden, dennoch geht die Übersicht und damit die Handhabbarkeit verloren. Eine Alternative wäre es, für die Lastfallgruppen einzelne Matrizen zu bilden, die deutlich übersichtlicher und beherrschbarer wären. Umgekehrt lässt sich die Gruppierung auch für Komponenten durchführen, d. h. Teilsysteme nach Abbildung 5-4 selektieren und eine Bauteil-Lastfall-Matrix für Subsysteme zusammenstellen. Hier kommt der Vorteil der Linearität der Matrix wieder zum Tragen, da sich die erstellten Matrizen jederzeit miteinander kombinieren lassen. Für eine praktische Umsetzung ist dies eine wichtige Grundvoraussetzung, weil vor allem die Konstrukteure in Teilsystemen, nämlich ihren Bauteilen mit den verwandten Schnittstellen, denken und ein Werkzeug benötigen, das Transparenz schafft und nicht zusätzliche Komplexität.
- **Erstellungsaufwand:** die Matrix zu erstellen bedeutet einen erheblichen Aufwand, der allerdings stark von der Zugänglichkeit und Übersichtlichkeit der benötigten Informationen abhängt. Dabei hängt es davon ab, welche Dokumente, z. B. in Form von Simulationslastenheften, CAE-Modellen, Datenbanken, etc. als Quellen herangezogen werden und wie diese strukturiert sind. Dabei darf nicht übersehen werden, dass bei Verknüpfungsmatrizen die Sorgfalt bei der Erstellung nicht hoch genug zu bewerten ist. Falsche Relationen können im vorliegenden Beispiel zu einer falschen Zuordnung von Bauteilen führen, die dann für bestimmte Lastfälle übersehen werden. Umgekehrt würden bestimmte Eigenschaften nicht mehr Bauteilen zugeordnet werden, obwohl sie für die Erfüllung eine zentrale Rolle spielen. Ist die Matrix aber einmal erstellt, so muss sie z. B. für die Nutzung in anderen Projekten nur angepasst werden und wenn man voraussetzt, dass sich Produktstruktur und Eigenschaften nicht grundlegend ändern, zumal wenn es sich um dasselbe Produkt handelt, so fällt nur ein Aufwand zu Adaption an.
- **Pflegeaufwand:** wie bereits bei der Dynamisierung der Matrix in Kapitel 6.3.3 angesprochen ist die Relation zwischen Komponenten und Eigenschaften zwar meist als konstant über den Entwicklungsprozess anzusetzen, so dass der Erstellungsaufwand zwar erst hoch ist, der Pflegeaufwand aber geringer ausfallen dürfte. Dennoch darf auch hier nicht übersehen werden, dass sich die Produktstruktur, vor allem auf der Ebene der Bauteile, häufig ändert und relativ spät im Prozess konstant ist. Es kommen somit Bauteile hinzu bzw. fallen weg und Eigenschaften müssen neu zugeordnet werden. Ein Pflegeaufwand fällt somit sicher an, es muss sich im Produktivbetrieb zeigen, wie hoch er tatsächlich ausfällt. Abhängig ist der Pflegeaufwand auch sicher vom Einsatzszenario der Bauteil-Lastfall-Matrix. Während bei der in Kapitel 6.1 vorgeschlagenen Methode der Teamzusammenstellung eine Pflege eher eine untergeordnete Rolle spielt, so muss die Matrix für die Nutzung als Informationsfilter ständig aktuell sein.

Wird die Matrix noch, wie in Kapitel 6.3.1 vorgeschlagen, um weitere Lastfälle und damit automatisch Bauteile erweitert, dann verschärfen sich die drei o.g. Punkte nochmals deutlich.

Um überhaupt eine Bereitschaft der Anwender zu erzeugen, solche Methoden anzuwenden und damit zu arbeiten, besteht hoher Forschungsbedarf, die Punkte zu lösen und die Verknüpfungen in eine IT-Landschaft einzubinden, die durch Teilautomatisierungen Erleichterungen für die Anwender schafft. Nach HUTTERER [2005] scheitern die Methodenanwendungen in der Industrie an vielen Faktoren, z. B. Komplexität, Theorielastigkeit, Starrheit, hohem Aufwand und weiteren Faktoren. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber, dass bei vereinfachter Anwendung und Lösung der o.g. Punkte eine Bauteil-Lastfall-Matrix bzw. im weiteren Sinne eine Verknüpfung von Komponenten und Eigenschaften eine Methode darstellen muss, die dem Anwender spürbaren Nutzen bringt, d. h. eine Effizienzsteigerung bedeutet.

6.5 Zusammenfassung Kapitel 6

Im sechsten Kapitel wurden verschiedene Anwendungs- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Lastfall-Bauteil-Matrix vorgestellt und diskutiert. Für die Verknüpfung der Dimensionen Produkt und Mensch kann die Matrix als Methode der Zusammenstellung von eigenschaftsorientierten Teams dienen. Um das Produkt mit den Daten zu verknüpfen und somit Informationsflüsse formal herzustellen wurde die Verknüpfung der Matrix mit den Informationsbausteinen vorgeschlagen. Unberührt davonbleibt jedoch die Frage, wie die Menschen mit den Informationsflüssen umgehen und wie Informationen richtig verarbeitet werden können.

Weiterhin wurde gezeigt, dass die Matrix ein hohes Potential bzgl. weiterer Anwendungen für die Integration von Konstruktion und Simulation bietet, besonders hinsichtlich der internen Prozesse in der Konstruktion mit einer Verknüpfung von Anforderungen und Bauteilen sowie in der Simulation mit dem Aufbau von Simulationsmodellen. Dabei darf nicht übersehen werden, dass es sich um grundlegende Ideen handelt, die es weiterzuerfolgen und auszuarbeiten gilt. Zwar existieren bereits kleine Softwarelösungen, die jedoch noch nicht industriellen Einsatz validiert und getestet sind. Die Probleme der Matrix hinsichtlich des Aufwands in der Erstellung, Pflege und die Übersichtlichkeit sind außerdem Gegenstand zukünftiger Forschungen auf diesem Gebiet.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und diskutiert. Es wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungs- und Handlungsschwerpunkte auf dem Gebiet der CAx-Integration gegeben, die trotz gewaltiger Fortschritte in den vergangenen Jahren vor großen Herausforderungen steht, besonders im Hinblick auf die Verzahnung von Teilprozessen.

7.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Verkürzte Entwicklungszeiträume, zunehmender Markt- und Wettbewerbsdruck, als Folge davon eine zunehmende Anzahl an Fahrzeugsegmenten und höhere Anforderungen prägen das Arbeitsumfeld der Fahrzeugindustrie. Reaktion der Hersteller auf diese Herausforderungen ist der verstärkte Einsatz virtueller Techniken in Entwicklung und Produktion. In der Entwicklung sind die CAD-Konstruktion und die CAE-Simulation maßgebliche Prozesse, die jeder für sich in den vergangenen Jahren große Fortschritte in der Hard- und Softwareleistung gemacht haben. Dadurch haben sich aber Rollen, Verantwortlichkeiten und die Interaktion von Konstruktion und Berechnung und als Folge davon auch die Entwicklungsprozesse verändert. Nun gilt es, eine Prozessintegration von Konstruktion und Simulation zu erreichen, die den neuen Randbedingungen gerecht wird und zu einer effizienten Arbeitsweise führt.

Ziel der Arbeit war es, den Ansatz zur Integration von Konstruktion und Simulation ganzheitlich und damit breiter anzulegen. Im zweiten Kapitel wurde sehr ausführlich der aktuelle Stand der Forschung und Technik zur CAD-CAE-Integration vorgestellt. Auffällig ist, dass nach einer Analyse der Einzelansätze klar wird, dass das Problem durch die Verzahnung von CAx-Werkzeugen bzw. dem reibungslosen Austausch von CAx-Daten gelöst werden soll und dass diese Ansätze den Schwerpunkt der Forschung darstellen. Obwohl viele die gewachsene Bedeutung der Simulation als wichtigen und vor allem aktiven Prozesspartner anerkennen, so sind viele Ansätze nicht danach ausgerichtet, die Simulation wird nach wie vor als Entwicklungswerkzeug behandelt, das in den Konstruktionsprozess integriert werden muss. Ein nächster zentraler Aspekt ist die Komplexität von Produkten und damit von Prozessen, die allzu häufig vernachlässigt wird. Folge ist, dass viele Ansätze nicht übertragbar und skalierbar sind, so dass ihr Lösungsraum sehr klein und spezifisch ist. Viele Ansätze beschäftigen sich mit der Konzeptphase von Produkten, in der die potentielle Komplexität wegen der Größe des möglichen Lösungsraumes zwar groß ist, die reale Produktkomplexität wegen der fehlenden Detaillierung und den eingeschränkten Anforderungen aber niedriger ist als in einer Serienentwicklung. Dadurch sind diese Ansätze, beispielsweise der Einsatz von neuronalen Netzen, vgl. Kapitel 2.3.8, nur für bestimmte Entwicklungsphasen gültig.

Aus der Überzeugung heraus, dass die Ingenieure, die täglich in der Konstruktion und Simulation arbeiten und auf diese Weise den Prozess gestalten, somit also auch am besten um seine

Probleme und Handlungsfelder Bescheid wissen, wurde eine Befragung in den Konstruktions- und Simulationsabteilungen von Unternehmen aus der Fahrzeugindustrie durchgeführt, ausgewertet und interpretiert (vgl. Kapitel 3.1). Das Resultat war, dass die Befragten nicht mit den CAx-Systemen unzufrieden sind, sondern dass die hauptsächlichen Erfolgsfaktoren eine bessere und effizientere Kommunikation und damit verbunden ein Informations- und Datenaustausch sind. Das bedeutet, dass die bisherigen Integrationsansätze um einige Dimensionen erweitert und ergänzt werden müssen. Eingeführt wurden dazu die fünf Dimensionen der CAx-Integration: der Mensch, das Produkt, der Prozess, die Daten und die Werkzeuge (vgl. Kapitel 3.2). Die Teilprobleme innerhalb der Dimensionen und die Verknüpfung der Dimensionen untereinander ergibt schließlich das Problemsystem der CAD-CAE-Integration. Zwei wesentliche Dimensionen der CAD-CAE-Integration, der Mensch als kommunizierendes Individuum und das Produkt mit seiner spezifischen Charakteristik als Rahmen der Integration wurden herausgegriffen, um Lösungsmöglichkeiten in beiden Dimensionen und in ihrer Verknüpfung zu diskutieren.

Die Kommunikation dient nach der Definition in der vorliegenden Arbeit dem Zwecke des Austausches von Daten und Informationen. Für die Konstruktion und Simulation bedeutet dies, die Probleme der Kommunikation zu erforschen und eine effiziente Kommunikation zu definieren (vgl. Kapitel 4.1.3). Aufbauend darauf lassen sich dann Informationsbausteine definieren, die den wechselseitigen Anforderungen aus der Konstruktion und Simulation gerecht werden und die notwendigen Daten und Informationen enthalten (vgl. Kapitel 4.3.3).

Das Produkt gibt den Rahmen der Integration vor und ist daher eine extrem wichtige, gleichwohl häufig in der Literatur vernachlässigte Dimension. Im Produkt vereinigen sich die unterschiedlichen Sichten, die komponentenorientierte der Konstruktion und die eigenschafts- bzw. funktionsorientierte der Simulation. Demzufolge bietet sich das Produkt als Integrationsansatz an, zumal es, zumindest bei einem Fahrzeug, das Kriterium hoher Komplexität erfüllt (vgl. Kapitel 5.1.1). Die unterschiedlichen Sichten von Konstruktion und Berechnung auf das Produkt manifestieren sich in einer unterschiedlichen Strukturierung von Komponenten und funktionalen Eigenschaften (vgl. Kapitel 5.1.2, 5.1.3 und 5.1.4). Zur Verknüpfung der unterschiedlichen Strukturen kann die Einflussmatrix verwendet werden, die ein bewährtes Instrument in der Prozess- und Informationsflussgestaltung ist (vgl. Kapitel 5.2). Resultat der Verknüpfung von Komponenten und funktionalen Eigenschaften ist die Bauteil-Lastfall-Matrix, die einen großen Teil der berechenbaren Fahrzeugeigenschaften und dazu wichtige Komponenten erfasst und zueinander in Relation setzt (vgl. Kapitel 5.3).

Die Matrix als Bestandteil der Dimension Produkt kann mit ihrem Verknüpfungscharakter zur Lösung von anderen Feldern des Problemsystems verwendet werden, vgl. Abbildung 3-16. Im sechsten Kapitel werden Vorschläge gemacht, wie die Bauteil-Lastfall-Matrix in der Praxis des Industrielltags verwendet werden kann. Dazu gibt es Möglichkeiten, eigenschaftsorientierte Teams zusammenzustellen (vgl. Kapitel 6.1), den Informationsfluss zu verbessern und die im vierten Kapitel definierten Informationsbausteine einzubauen (vgl. Kapitel 6.2), die bereits teilweise umgesetzt wurden. Etwas visionärer sind die Ansätze aus dem Kapitel 6.3, die zwar ebenfalls z. T. schon als Softwareprototypen existieren, jedoch mit dem aktuellen Entwicklungsstand noch nicht umsetzbar sind.

Die Arbeit stellt einen ersten Ansatz dar, die Integration von Teilprozessen in der Entwicklung ganzheitlich anzugehen, dabei aber nicht den einen Prozess im anderen aufgehen zu lassen, wie gerade im Zusammenhang von Konstruktion und Berechnung häufig vorgeschlagen⁵⁴, sondern beide Prozesse gleichberechtigt zu vernetzen und zu verknüpfen. Durch die Integration der Produktsichten mit der Bauteil-Lastfall-Matrix kann eine stärker funktions- und eigenschaftsorientierte Entwicklung erreicht werden, die weniger funktionsbedingte Änderungen in späten Entwicklungsphasen nach sich zieht.

In der Arbeit werden zwei zentrale Gedanken diskutiert: einmal die Integrationsproblematik auch von vermeintlich rein technischen Problemstellungen mehrdimensional anzugehen, d. h. Lösungen zu entwickeln, die dem Produkt, dem Menschen, den Prozessen, den Daten und den Werkzeugen gerecht werden. Der zweite Gedanke ist die Integration der Produktsichten durch die Strukturierung von Produkten nach Komponenten und Eigenschaften und deren Verknüpfung untereinander. Dies stammt u. a. aus der Erkenntnis, dass die Komplexität des Produktes entscheidenden Einfluss auf den gewählten Ansatz hat, weswegen viele der in Kapitel 2 vorgestellten Ansätze nicht skalierbar und übertragbar sind. Im Vordergrund steht dabei, die in einer Automobilentwicklung auftretenden Zielkonflikte, die z. B. durch verschiedene, sich widersprechende Anforderungen auftreten, sichtbar zu machen. Diese Anforderungen stehen untereinander und zu den Bauteilen in Beziehung und diese Beziehungen werden durch die Bauteil-Lastfall-Matrix sichtbar. Unter dem Druck der wachsenden Anforderungen und der Verknappung der Ressourcen in Form von Zeit und Entwicklungsbudgets müssen alle Formen von Entwicklungsaktivitäten eng vernetzt ablaufen, nur so kann ein ausgewogenes und stimmiges Produkt erreicht werden [EILETZ 1999]. Dies bedeutet aber für die Zukunft, dass der Integration von Einzelaktivitäten wie der numerischen Berechnung in den Prozess noch mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden muss, um die Zielkonflikte rechtzeitig und nachhaltig auszuräumen [EILETZ 1999].

7.2 Ausblick auf zukünftige Herausforderungen in der CAD-CAE-Integration

Der in Kapitel 2 dargestellte Stand der Forschung und das in Kapitel 3.2 aufgespannte Problemsystem zeigen, dass es nach wie vor erheblichen Forschungsbedarf auf dem Gebiet der CAD-CAE-Integration gibt. Vor allem die verstärkte Einbeziehung der Dimensionen Produkt, Mensch und Prozess bedeutet eine Erweiterung des Forschungsfeldes in den Bereich der Systemtheorie, von der in der vorliegenden Arbeit bereits erste Ansätze vorhanden sind. Eine Einbeziehung anderer Disziplinen ist vor allem für die Dimension Mensch unerlässlich, hier geht es nicht nur um technische Lösungen, sondern es spielen menschliche Faktoren, wie Kompetenzen, Verantwortlichkeiten, Gefühle, etc., eine große Rolle. Die Implementierung

⁵⁴ In vielen Veröffentlichungen wird daher von der Integration der Berechnung in den Konstruktionsprozess gesprochen, also eine Art Absorption der Berechnung durch die Konstruktion. Dies wird der Rolle und auch der zunehmenden Spezialisierung sowohl in der Konstruktion als auch in der Berechnung aber in keiner Weise gerecht.

von technischen Lösungen oder restrukturierten Prozessen scheitern in der Praxis nach den Erfahrungen des Autors häufig an den Menschen, die sie umsetzen sollen, weniger an der Unvollkommenheit der Theorie. Das Problemsystem aus Abbildung 3-15 gibt bereits einen Ausblick auf die vielen Handlungsfelder der CAC-CAE-Integration, vor allem die Verknüpfung der Einzellösungen, von denen viele in Kapitel 2.3 erläutert wurden, stellt ebenfalls eine große Herausforderung dar. Dabei darf jedoch nicht übersehen werden, dass auch Ansätze wie z. B. neuronale Netze, bidirektionale Parametrik oder Agentensysteme weit von einer breiten Anwendung im industriellen Umfeld sind und auch hier noch große Anstrengungen in der Forschung notwendig sind, um ihre Wirksamkeit auch in komplexen Systemen zu zeigen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Simulation auf die numerische Berechnung reduziert, um innerhalb einer definierten Systemgrenze sinnvolle Lösungen zu entwickeln, die sich dann auch auf weitere CAx-Integrationsprozesse übertragen lassen. Der Abgleich von Berechnung und Versuch ist gerade für die virtuelle Produktentwicklung immens wichtig, denn eine der zentralen Herausforderungen der nächsten Jahre besteht darin, Berechnung und Versuch intelligent zu verzahnen, so dass sich beide Disziplinen ergänzen und Synergien statt Konkurrenzsituationen entstehen. Nach wie vor ist der Versuch für viele Disziplinen unverzichtbar und dient in Form von Komponenten- und Ersatzversuchen als Eingangsinformation für die numerische Berechnung. Der Integration von CAE und CAT kommt demzufolge für die virtuelle Produktentwicklung eine ebenso hohe Bedeutung zu wie der CAD-CAE-Integration. Dabei lassen sich Ansätze der vorliegenden Arbeit auf die CAE-CAT-Integration übertragen: das Problemsystem mit seinen fünf Dimensionen und die Verknüpfung von Komponenten und Eigenschaften ist für den Versuch genauso wichtig und gültig wie für die Berechnung und die Konstruktion. Kernproblem der CAx-Integration wird in naher Zukunft nicht sein, eine Disziplin aus Kostengründen abzuschaffen (Versuch), sondern durch eine Integration der CAx-Teilprozesse die Werkzeuge intelligent zu nutzen.

8. Verzeichnisse

8.1 Glossar

AI

Artificial Intelligence, künstliche Intelligenz, ist eine Sparte der Computerwissenschaften, die sich mit dem intelligenten Verhalten, Lernen und der Anpassung von Maschinen beschäftigt [WIKIPEDIA 2006 A].

Anforderung

Definiertes Verhalten oder eine bestimmte Eigenschaft, anzunehmen von einem Objekt, einer Person oder einer Aktivität zur Sicherstellung einer Leistung in einem Wertschöpfungsprozess.

Baustufe

physischer Prototyp.

CAD

Computer Aided Design: Rechnergestütztes Konstruieren (CAD) durch geometrisches Gestalten, Entwerfen und Ausarbeiten in der Konstruktion.

CAE

Computer Aided Engineering: Rechnerunterstütztes Auslegen von technischen Produkten im Rahmen des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses.

CAM

Computer Aided Manufacturing, rechnergestützte Fertigung.

CAT

Computer Aided Testing, funktionale Tests von Systemen, Geräten und Komponenten.

CE

Concurrent Engineering, siehe Simultaneous Engineering.

CFD

Computational fluid dynamics, englisch für numerische Strömungssimulation.

CPU

Central Processing Unit, Hauptprozessor eines Computers.

DMM

Domain Mapping Matrix.

DMU

Digital Mock-Up: Digitale Attrappe, die die rechnerbasierte, wirklichkeitsgetreue, geometrische Repräsentanz eines Produktes darstellt [MARKWORTH 2003].

DSM

Design Structure Matrix.

EDM

Engineering Data Management: Verwaltung von Ergebnissen aus der Simulation (Definition PE).

eEPK

erweiterte ereignisorientierte Prozesskette.

EID

Element Identification.

EPK

Ereignisorientierte Prozesskette.

ERP

Enterprise Resource Planning.

FEM

Finite-Elemente-Methode, Berechnungs- und Simulationsverfahren, um Bauteilverhalten unter statischer oder dynamischer Belastung zu simulieren und das Bauteil im Rahmen der virtuellen Entwicklung entsprechend zu optimieren.

FE-Rechenmodell

siehe Input Deck.

FE-Submodell

siehe Include.

FMVSS

Federal Motor Vehicle Safety Standard: Gesetze der amerikanischen Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration).

Greenhouse

Dachhimmel mit Säulenverkleidungen.

HIC

Head-Injury-Criteria, aus 3-dimensionaler Kopfbeschleunigung berechneter Wert der Kopfbelastung.

IGES

Initial Graphics Exchange Specification, neutrales Datenformat.

Include

Ein Include ist ein Submodell für ein CAE-Modell, z. B. das Frontend, der Motor, das Fahrwerk, die Tür vorne, die Karosserie, aber auch die verschiedenen Standardkomponenten wie Barrieren oder Dummies.

Input Deck

Ein Input Deck ist ein Rechenmodell für die FEM. Es beinhaltet Informationen für den Solver in Form von Attributen (z. B. Berechnungsdisziplin/-subdisziplin, Fahrzeugprojekt, Baustufe, Variantenbezeichnung, Lastfall, Anzahl der zu verwendenden Prozessoren). Ein FE-

Rechenmodell (Input Deck) besteht dann aus mehreren Include-Files und einer Steuerdatei, die die Includes verwaltet.

KBE

Knowledge-Based-Engineering.

Lastfall

Umsetzung funktionaler Anforderungen in berechenbare Szenarios.

Meta-Daten

beschreibende, klassifizierende bzw. attributive Informationen zur Verwaltung und Organisation von Dateien (Bsp.: Sachnummer, Benennung, Ersteller).

MKS

Mehrkörpersimulation, ein numerisches Verfahren zur Simulation von Bauteilen und kompletten Maschinen.

NSM

nonstructural mass, englisch für unstrukturierte Masse; bezeichnet eine Repräsentationsform eines Bauteils, das nicht als Netz in der FE-Analyse modelliert wird, sondern deren Masse auf benachbarte Bauteile verteilt wird.

NVH

Noise, Vibration and Harshness, englisch für Geräusch, Vibration und Härte, die ein Fahrzeug empfindet. Steht für die Berechnungsdisziplin, die diese Funktionen absichert.

OEM

Original Equipment Manufacturer.

OS

Occupant Safety, englisch für Insassensicherheit. Steht für die Berechnungsdisziplin, die diese Funktionen absichert.

Output-File

Ergebnisdatei der Berechnungen (Solving).

Package

Das Package beschreibt die geometrischen Abmessungen sowie die räumliche Anordnung aller Bauteile und Aggregate, die sich im Fahrzeug befinden.

Partialmodell

Das Partialmodell, auch Partialproduktmodell, bezeichnet eine Sicht auf ein Produktmodell. In dieser Sicht werden nur die relevanten Daten angezeigt, z. B. für die Konstruktion nur die 3D-CAD-Daten und die Produktstruktur.

PDF

Das Portable Document Format (PDF) ist ein plattformübergreifendes Dateiformat für Dokumente.

PLM

Produktlebenszyklusmanagement (PLM, engl. product lifecycle management) bezeichnet ein IT-Lösungssystem, mit dem alle Daten, die entlang des Lebenszyklusses (Entstehung, Lager-

haltung, Vertrieb) eines Produkts anfallen, einheitlich gespeichert, verwaltet und abgerufen werden. Ein PLM System ist aufgrund der Komplexität nicht als käufliches Produkt, sondern als eine Strategie zu verstehen. PLM-Systeme bestehen im Kern aus PDM-Systemen.

Postprocessing

englisch für Nachbearbeitung, bezeichnet den Prozess zur Auswertung einer Simulation.

PP

Pedestrian Protection, englisch für Fußgängerschutz, steht für die Berechnungsdisziplin, die diese Funktion absichert.

Preprocessing

Preprocessing, englisch für Vorverarbeitung, bezeichnet den Prozess zum Aufbau eines Rechenmodells.

Product Life Cycle

englisch für Produktlebenszyklus (siehe PLM).

PDM

Produktdatenmanagement.

Referenzmodell

Ein Referenzmodell umfasst die allgemeingültige, logisch abstrahierte Darstellung sowohl funktionaler wie auch informationsbezogener Sachverhalte eines zu betrachtenden Bereichs. Ein Referenzmodell beinhaltet demnach keine Werte oder konkrete Daten. Erst bei der Instanzenbildung wird das Referenzmodell zu einem Produktmodell für ein bestimmtes Produkt oder eine bestimmte Baugruppe. Sinngemäß das Gleiche gilt auch für ein Prozessreferenzmodell.

Reifegrad

Der Reifegrad kennzeichnet die Phasen des Produktanlaufs bzw. -durchlaufs eines Artikels oder einer Unterlage (Entwurf, Detaillierung, Prototyp...).

Rohkarosserie

Karosseriegerippe ohne Türen und Klappen, besteht aus Vorbau, Bodengruppe, Seitenrahmen, Dachstruktur und Hinterwagen (synonym Rohbau).

SADT

Structured Analysis and Design Technique, Methode zur Beschreibung von Prozessabläufen unter Berücksichtigung der Ressourcen und der Steuerinformationen.

SDM

Simulations Daten Management.

SE

Simultaneous Engineering: die zielgerichtete, interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit von Produkt- und Vertriebsentwicklung [EHRENSPIEL 2003].

Segment

Ausschnitt oder Teil eines Ganzen [WIKIPEDIA 2007]. Bezogen auf den Automobilmarkt ist die zunehmende Anzahl an Modellen und davon abgeleitete Varianten gemeint, z. B. SUV (Sport Utility Vehicles), MPV (Multi Purpose Vehicle), etc.

Solving

Solving, englisch für Problemlösen, bezeichnet den Berechnungsvorgang bei einer Simulation.

SOP

englisch für Start of Production, Produktionsbeginn.

Stammdaten

Die Stammdaten umfassen alle Metadaten und nicht-geometrische Daten.

STEP

Standard for the Exchange of Product data, neutrales Datenformat.

Topologie

Geometrische Gestalt des Produktes, griechisch "topos" - Ort und "logos" – Lehre.

Topologieoptimierung

Berechnung der optimalen Materialverteilung in einem vorgegebenen Designraum unter bestimmten Bedingungen.

Trimmed Body

Karosserie mit Anbauteilen ohne Aggregate und Fahrwerk zur NVH-Berechnung. Das Trimmed-Body-Karosseriemodell ist ein Teil des Gesamtfahrzeugmodells ohne Aggregate, Getriebe, Fahrwerk und Abgasanlage, dafür mit entsprechender Massenausstattung. Das Verhalten ähnelt dem Gesamtfahrzeug, das Modell und die Ergebnisse sind jedoch eindeutiger zu analysieren [SANDFORT & KLEINE TRIMPE 2004].

VDA

Verband der Automobilindustrie.

VDAFS

VDA-FlächenSchnittstelle des Verbands der Automobilindustrie, vereinfachte Version der IGES-Schnittstelle zum Austausch von Modelldaten zwischen verschiedenen CAD-Systemen; 3D-Modelle werden durch ihre Oberfläche beschrieben.

Wrapper

Ein Programm, das als Schnittstelle zwischen dem aufrufenden und dem umschlossenen (engl. *wrapped*) Programmcode agiert. Dies kann aus Kompatibilitätsgründen eingesetzt werden, wenn beispielsweise der umschlossene Code eine andere Programmiersprache verwendet, zur Sicherheit, um beispielsweise den Zugriff einzuschränken bzw. zu erweitern oder um etwas zu emulieren [WIKIPEDIA 2006B].

XML

XML steht für Extensible Markup Language und ist ein internet-basiertes, universelles Format, um Daten und Dokumente abzubilden und über das Internet auszutauschen.

8.2 Literaturverzeichnis

ADAMS, V. (2006):

How to manage Finite Element Analysis in the Design Process.
Glasgow: NAFEMS 2006.

AIFAOUI, N.; DENEUX, D.; SOENEN, R. (2006):

Feature-based interoperability between design and analysis processes. In: *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17.
Niederlande: Springer Science and Business Media 2006.

ALBERS, A.; ALBRECHT, M. (2002):

Vorhersage subjektiver Komforturteile mittels künstlicher neuronaler Netze. In: *Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau*.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2002 (VDI-Berichte 1701).

ALBERS, A.; NOWICKI, L. (2003):

Integration der Simulation in die Produktentwicklung. Neue Möglichkeiten zur Steigerung der Qualität und Effizienz. In: *Tagungsband zum Symposium Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung*.
Bremen: Fraunhofer-Institut IFAM 2003.

AMFT, M. (2003):

Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung.
München: Dr. Hut-Verlag 2003 (Zugl. Diss. TU München 2002).

ANDERL, R. (2002):

Produktdatentechnologie B.: Produktdatenmanagement.
Darmstadt: TU, DiK, Vorlesungsskript 2002.

ANDERSSON, K. (1999):

A Design Process Model for Multiview Behaviour Simulations of Complex Products. In: *Proceedings of DETC '99, 1999 ASME Engineering Technical Conferences*.
Las Vegas: ASME 1999.

ARNOLD, A. (1997):

Kommunikation und unternehmerischer Wandel.
Wiesbaden: Gabler 1997 (Zugl. Diss. Universität St. Gallen, CH, 1997).

BACHEM, H.; NIEDERMEYER, S. (2006):

CAE-basierte Optimierung hinsichtlich der Anforderung Fußgängerschutz. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2006 (VDI-Berichte 1967.2).

BADKE-SCHAUB, P.; STEMPFLE, J.; WALLMEIER, S. (2001):

Transfer of experience in critical design situations. In: International Conference in Engineering Design ICED 2001, Glasgow, Großbritannien.

Glasgow: I Mech E 2001.

BALASUBRAMANIAN, B.; WINTERSTEIN, R. (1998):

Auf dem Weg zur digitalen Fahrzeugentwicklung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.

Düsseldorf: VDI-Verlag 1998 (VDI-Berichte 1411).

BÄR, T. (1998):

Phasenübergreifende Einsatz der Feature-Technologie für die Integration von Berechnungen in die frühen Phasen des Konstruktionsprozesses.

Saarbrücken: Diss. Universität des Saarlandes 1998 (Schriftenreihe Produktionstechnik Band 15).

BÄR, T. (2002):

Rechnerunterstützte Konstruktionssysteme (FEM). Skriptum zur Vorlesung.

Dresden: HTW 2002.

BENDER, K. (2001):

PDM-Systeme. Skriptum zur Vorlesung.

München: TU, Lehrstuhl für Informationstechnik 2001.

BEUTNER, E.; LIEBERMANN, H.; NEUKIRCHNER, H. (1998):

Modellierung und Simulation – ihre Rolle im Prozess der virtuellen Produktentwicklung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.

Düsseldorf: VDI-Verlag 1998 (VDI-Berichte 1411).

BIANCONI, F. (2002):

Bridging the Gap between CAD and CAE using STL-Files. In: International Journal of CAD/CAM, Vol. 2, Nr. 1.

Wiesbaden: NAFEMS 2002.

BINDE, P. (2003):

The Usage of Feature-Technology for Knowledge Processing in the Scope of Design-Embedded FEM-Analysis.

Wiesbaden: NAFEMS 2003.

- BIRKHOFER, H.; JÄNSCH, J. (2003):
Interaction between Individuals. In: Human Behaviour in Design.
Berlin: Springer-Verlag 2003.
- BÖHME, M. (2004):
Ein methodischer Ansatz zur parametrischen Produktmodellierung in der Fahrzeugentwicklung.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Fortschrittsbericht Reihe 12 Nr. 567).
- BONGULIELMI, L. (2002):
Die Konfigurations- & Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zur Darstellung konfigurationsrelevanter Aspekte im Produktentstehungsprozess.
Zürich: Diss. ETH Zürich Nr. 14904 2002.
- BOSHOFF, F. (1997):
Integration von FEM-Berechnungen in den CAD-gestützten Konstruktionsprozess durch bidirektionalen Geometrieaustausch.
Aachen: Shaker-Verlag 1997 (zugl. Diss. RWTH Aachen).
- BRAß, E. (2005):
Konstruieren mit CATIA V5.
München: Hanser-Verlag 2005.
- BREITLING, T.; DRAGON, L.; GROSSMANN, T. (2006):
Digitale Prototypen: ein weiterer Meilenstein zur Verbesserung der Abläufe und Zusammenarbeit in der PKW-Entwicklung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2006 (VDI-Berichte 1967.1).
- BROWNING, T. R. (2001):
Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions. In: IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 48, No. 3.
Newark: IEEE 2001.
- BÜHRER, R.. (2003):
Methode für Kommunikationsmanagement in Veränderungsprojekten - Eine Methode zur Unterstützung der Einführung vom Konzept Digitales Produkt.
St. Gallen: Diss. Universität St. Gallen, CH, 2003.
- BURBLIES, A.; FRICKE, H.; HENNIGS, D.; BANGERT, C.; HOUGARDY, P. (2003):
Rückführung von optimierten Strukturen in den Entwicklungsprozess. In: Simulation - Das Fachmagazin für FEM, CFD und MKS, Ausgabe 1/2003.
Karlsruhe: FE-Design 2001.

- BURR, H.; DEUBEL, T.; VIELHABER, M.; HAASIS, S.; WEBER, W. (2003):
Challenges for CAx and EDM in an international automotive company. In: Proceedings of ICED 03, Stockholm 2003.
Stockholm: ICED 2003.
- BURR, H.; DEUBEL, T.; VIELHABER, M.; HAASIS, S.; WEBER, W. (2004):
CAx/EDM integration - Enabler for methodical benefits in the design process.
Dubrovnik: Design 2004.
- CARL, A. (2000):
Konstruktive Berechnungsmodelle auf Basis neuronaler Netze.
Berlin: Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik 2000 (zugl. Diss. TU Berlin 2000).
- CARSON SKALAK, S. (2000):
Implementing concurrent Engineering in small Companies.
New York: Marcel Dekker 2000.
- CASCINI, G.; PIERONI, N.; RISSONE, P. (2002):
Plastic design: Integrating TRIZ creativity and semantiv knowledge portals In: Proceedings of the TMCE 2002, April 22–26, 2002.
Wuhan: TMCE China 2002.
- CONRAD, K.-J. (2005):
Grundlagen der Konstruktionslehre.
München: Hanser-Verlag 2005.
- CONRAT, J.-I. (1998):
Änderungskosten in der Produktentwicklung.
München: Technische Universität, Diss. 1998.
- CRABB, H.C. (1998):
The Virtual Engineer.
Fairfield: ASME Press 1998.
- CROSBY, P.B. (1979):
Quality is free.
New York: McGraw Hill 1979.
- CROSS, N. (1996):
Engineering Design Methods.
Chichester: Wiley 1996.

CURRY, T. (2003):

Creative Design under Product Lifecycle Constraints – the Future of Product Development.

Stockholm: ICED 2003.

DAENZER, W. F.; HUBER, F. (HRSG.) (2002):

Systems Engineering – Methodik und Praxis.

Zürich: Industrielle Organisation 2002.

DANKWORT, W.; FAIBT, K.-G. (2002):

Fiores-II – CAD im Spannungsfeld zwischen Ästhetik und Design. In: Entwicklungen im Karosseriebau.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2002 (VDI-Berichte 1674).

DAI, F. (2003):

The Business Benefits of Simulation.

Wiesbaden: NAFEMS 2003.

DANILOVIC, M.; (1999):

LOOP - Leadership and Organization of Integration in Product Development.

Linköping: Universität, Dissertation No. 40 1999.

DANILOVIC, M.; BÖRJESSON, H. (2001):

Managing the multiproject environment. In: Proceedings of the third dependence structure matrix (DSM) international workshop.

Cambridge (USA): 2001.

DANILOVIC, M., BROWNING, T. (2004)

A Formal Approach for Domain Mapping Matrices (DMM) to Complement Design Structure Matrices (DSM), Proceedings of the 6th Cambridge DSM Workshop.

Cambridge (UK): Cambridge Engineering Design Centre, University of Cambridge 2004.

DANILOVIC, M.; SANDKULL, B. (2005)

The Use of Dependence Structure Matrix and Domain Mapping Matrix in managing Uncertainty in multiple Project Situations. In: International Journal of Project Management 23.

Cambridge (UK): Elsevier 2005.

DEUBZER, F.; KREIMEYER, M; HERFELD, U.; LINDEMANN, U. (2005A):

A structured holistic approach for the integration of CAD and CAE environments. In: Proceedings of ProSTEP iViP Science Days 2005.

Darmstadt: Cross-Domain-Engineering 2005.

- DEUBZER, F.; KREIMEYER, M.; JUNIOR, T.; ROCK, B. (2005B):
Der Änderungsmanagement Report 2005. In: CiDaD-Working-Paper-Series.
Garching: Lehrstuhl für Produktentwicklung, TU München, 2005.
- DICHTL, E.; ISSING, O. (HRSG.) (1993):
Vahlens großes Wirtschaftslexikon, Band 2.
München: Vahlen-Verlag 1993.
- DIN 44300 (1982):
Informationsverarbeitung - Begriffe.
Berlin: Beuth-Verlag 1982.
- DIN 6789 (1990):
Dokumentationssystematik.
Berlin: Beuth-Verlag 1990.
- DROSDOWSKI, G. (1990):
Duden Fremdwörterbuch.
Mannheim: Dudenverlag 1990.
- DSM (2006):
The Design Structure Matrix (DSM) Homepage.
Entnommen am 27.11.2006, URL
http://www.dsmweb.org/index.php?option=com_content&task=view&id=48&Itemid=38
- DUBBEL (1995):
Taschenbuch für den Maschinenbau (Hrsg.: Pahl, W.; Küttner, K.-H.).
Berlin: Springer 1995.
- DÜCHTING, C. (2005):
Aufbau eines freigabe- und kommunikationsbasierten Assistenzsystems im Produktentstehungsprozess.
Dortmund: Diss. Universität Dortmund 2005.
- DUNGS, S.; KÖHLER, P.; LUPA, N. (2006):
Das Mastermodell als Basis teilautomatisierter Simulation. In: Produkt Daten Journal Nr. 7.
Darmstadt: ProSTEP iViP 2006.
- DYLA, A. (2002):
Modell einer durchgängig rechnerbasierten Produktentwicklung.
München: TU, Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik, Diss. 2002.

- EHRENSPIEL, K. (2003):
Integrierte Produktentwicklung.
München: Hanser 2003.
- EICHINGER, M.; MAURER, M.; LINDEMANN, U. (2006):
Using Multiple Design Structure Matrices.
Dubrovnik: Design 2006.
- EIGNER, M.; STELZER, R. (2001):
Produktdatenmanagementsysteme.
Berlin: Springer 2001.
- EILETZ, R. (1999):
Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte - am Beispiel PKW-Entwicklung.
Aachen: Shaker-Verlag 1999 (Zugl. München: TU, Diss. 1999).
- EISEHUT, A. (1999):
Service Driven Design: Konzepte und Hilfsmittel zur informationstechnischen Kopplung von Service und Entwicklung auf der Basis moderner Kommunikations-Technologien.
Zürich: Diss. ETH Zürich Nr. 13175 1999.
- EVERSHEIM, W. (2002):
Innovationsmanagement - Kooperationen. Skriptum zur Vorlesung Innovationsmanagement.
Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), 2002.
- FORSEN, J.; HOFFMANN, R. (2002):
Assoziative Netze in der Karosserieentwicklung In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2002 (VDI-Berichte 1701).
- FORSEN, J.; KRESS, H. (2004):
Frühe Konzeptauslegung Gesamtfahrzeug – Neuronale Netze ein Lösungsansatz? In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Berichte 1846).
- FRANKENBERGER, E. (1997):
Arbeitsteilige Produktentwicklung.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1997 (zugl. Diss. TU Darmstadt).

FRISCH, N. (2004):

Verfahren zur Unterstützung der Arbeitsabläufe bei der Crash-Simulation im Fahrzeugbau.

Stuttgart: Universität, Fakultät für Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik, Diss. 2004.

FUCHS, D. (2006):

Konstruktionsprinzipien für die Problemanalyse in der Produktentwicklung.

Garching: TU München, Diss. 2006.

FUJITA, K.; KIKUCHI, S. (2002):

Distributed Design Support System for concurrent Process of preliminary Aircraft Design.

In: Proceedings of the TMCE 2002, April 22–26, 2002.

Wuhan: TMCE China 2002.

FZI, FORSCHUNGSZENTRUM INFORMATIK – FORSCHUNGSBEREICH PDE (2006):

PLM-Portal, PDM-Glossar.

Entnommen am 25.06.2006, URL: <http://www.plmportal.de/index.php?id=909>.

GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.-W. (2000):

Kooperatives Produktengineering.

Paderborn: HNI 2000.

GEE, K. (2001):

Vehicle Analysis using an Agent-based Analysis Tools Framework. In: Proceedings of DETC'01 ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.

Pittsburgh: ASME 2001.

GERBINO, S.; BRONDI, A. (2004):

Interoperability Issues among CAD-Systems: a Benchmarking Study of 7 commercial CAD-Systems.

Dubrovnik: Design 2004.

GERHARD, D. (2000):

Erweiterung der PDM-Technologie zur Unterstützung verteilter kooperativer Produktentwicklungsprozesse.

Aachen: Shaker 2000 (zugl. Diss. Universität Bochum 2000).

GOLTZ, F. (2000):

Collaborative Product Development in a distributed Engineering Environment. In: IMW Institutsmitteilungen Nr. 25.

Clausthal: TU, 2000.

GOLTZ, F. (2003):

Engineering Workflow - integriertes Daten- und Prozessmanagement in der unternehmensübergreifenden Produktentwicklung. In: IMW Institutsmitteilungen Nr. 28. Clausthal: TU, 2003.

GÖPFERT, J. (1998):

Modulare Produktentwicklung.
Wiesbaden: Gabler-Verlag 1998 (zugl. Diss. Universität München 1998).

GÖSSING, H. P. (2000):

Virtuelle Auslegung der Karosseriestruktur für Betriebsbeanspruchungen.
München: TU, Fakultät für Bauingenieurwesen, Diss. 2000.

GÖTZ, A.; MAIER, T. (2006):

Design for Humans - Differenzierung und Integration von Konstruktion und Technischem Design in der Produktentwicklung. In: 17: Symposium "Design for X".
Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen 2006.

GRABNER, J.; NOTHHAFT, R. (2002):

Konstruieren von PKW-Karosserien.
Berlin: Springer 2002.

GROBE ENTRUP, N. (2004):

Product Lifecycle Management - Produktstrukturierung. Firmenpräsentation GPS Schuh & Co GmbH.
Würselen: GPS Schuh & Co GmbH 2004.

GROßMANN, T. (1998):

Zukünftige Ausrichtung des CAE-Einsatzes in der PKW-Entwicklung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1998 (VDI-Berichte 1411).

GRUBER, K.; WIDMANN, U.; REICHENEDER, J.; ELBERFELD, J. (2005):

CAE Data Management at Audi AG. In: NAFEMS BENCHmark Magazine.
Wiesbaden: NAFEMS 2005.

GÜNZLER, A. (2004):

Integrationskonzepte in der modellbasierten Produktentwicklung.
München: TU, Diss. 2005.

GUMMERSBACH, F. (2000):

Informationsbasis zur Konstruktion lärmarmen Produkte. In: IMW Institutsmitteilungen Nr. 25.

Clausthal: TU, 2000.

HADERER, G. (2000):

Integration von Gestaltung und Berechnung mittels CORBA.

Berlin: TU, Diss. 2000.

HAHN, A. (2005):

Integration verteilter Produktmodelle durch Semantic-Web-Technologien. In: Wirtschaftsinformatik, Band 47, Heft 4.

Wiesbaden: 2005.

HASSEL, K.; GÜMBEL, C.; DUNCAN, R.; FALKENBURGER, P. (1998):

Verteilt-kooperative Arbeitsweise: ein neuer Weg in der Fahrzeugentwicklung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.

Düsseldorf: VDI-Verlag 1998 (VDI-Berichte 1411).

HAYES, E. E.; REGLI, W. C. (2001):

Integrating Design Process Knowledge with CAD Models. In: Proceedings of DETC'01 ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.

Pittsburgh: ASME 2001.

HEISERER, D.; CHARGIN, M. (2002):

Optimierung von Schweißpunkten unter Fertigungsgesichtspunkten mittels Verwendung von neuronalen Netzen.

München: BMW AG 2002.

HENSELER, P. (2004):

Die Konfigurations- und Verträglichkeitsmatrix als Beitrag für eine differenzierte Betrachtung von Konfigurierungsproblemen.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (zugl. Diss. ETH Zürich 2004).

HELLMUTH, T. (1997):

Terminologiemanagement – Aspekte einer effizienten Kommunikation in der computerunterstützten Informationsverarbeitung.

Konstanz: Universität, Fakultät für Verwaltungswissenschaft, Diss. 1997.

HENRICH, A.; MORGENROTH, K. (2006):

Bedeutung des Design for X für die Informationsversorgung von Entwicklern innerhalb des Entwicklungsprozesses. In: 17: Symposium "Design for X".

Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen 2006.

HERFELD, U.; KREIMEYER, M.; DEUBZER, F.; LINDEMANN, U.; KNAUST, U. (2006):

Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und Simulation in der Karosserieentwicklung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2006 (VDI-Berichte 1967.1).

HERFELD, U.; DEUBZER, F.; KREIMEYER, M.; LINDEMANN, U. (2005):

Application of CAD-integrated FEM-Analysis as a step towards better integration of simulation into the design process. In: Proceedings of the 9th International Research/Expert Conference – Trends in the Development of Machinery and Associated Technology.

Antalya, Türkei, 2005.

HESSEL, C. (2003):

Integration der Topologieoptimierung in den CAD-gestützten Entwicklungsprozess.

Aachen: Shaker-Verlag (zugl. Diss. RWTH Aachen 2003).

HEYNEN, C. (2001):

Wissensmanagement im Berechnungsprozess der Produktentwicklung.

Düsseldorf: VDI-Verlag (zugl. Diss. Uni. Erlangen 2001).

HIEROLD, R.; MERKEL, M.; SCHUMACHER, A. (2004):

Effiziente Nutzung moderner CAE-Tools beim Konstruieren von Karosseriestrukturen. In: Entwicklungen im Karosseriebau.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Berichte 1833).

HOFFMANN, R. (2002):

Integration höherwertiger Feature-Elemente in den rechnergestützten Konstruktionsprozess.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2002 (zugl. Diss. RWTH Aachen 2001).

HÖHNE, G.; BRIX, T. (2003):

Methods, Tools and Prerequisites. In: Human Behaviour in Design.

Berlin: Springer-Verlag 2003.

HOPPE, A.; KAUFMANN, M.; SAUTER, J. (2005):

Multidisciplinary Optimization considering Crash and NVH Loadcases. In: Entwicklungen im Karosseriebau. In: Lecture at ATZ/MTZ Virtual Product Creation 2005. Stuttgart: ATZ/MTZ 2005.

HUBKA, V. (1984):

Theorie technischer Systeme.
Berlin: Springer-Verlag 1984.

HUTTERER, P. (2005):

Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die methodische Produktentwicklung.
Garching: TU München, Diss. 2005.

IGENBERGS, E. (1993):

Systemtechnik. Skriptum zur Vorlesung.
München: Lehrstuhl für Raumfahrttechnik, TU München 1993.

IRLINGER, R. (1998):

Methoden und Werkzeuge zur nachvollziehbaren Dokumentation in der Produktentwicklung.
München: Shaker-Verlag 1998 (zugl. Diss TU München 1999).

IRRGANG, R.; DICK, A.; REDANZ, W. (1996):

EDM als Grundlage für einen optimierten CAE-Einsatz in der Fahrzeugentwicklung. In: Berechnung im Automobilbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1996 (VDI-Berichte 1283).

ISO103303-1 (1994):

Industrial Automation Systems and Integration - Product Data Representation and Exchange. Part1: Overview and fundamental principles.
Genf: International Organization for Standardization (ISO) 1994.

JENNE, F. (1996):

PDM-basiertes Entwicklungsmonitoring.
Aachen: Shaker-Verlag 2001 (zugl. Diss. Universität Karlsruhe).

KALJAS, F.; REEDIK, V. (2005):

On using the DSM Technology Approach to synergy-based Design of interdisciplinary Systems.
Melbourne: ICED 2005.

KALMBACH, R.; KEINHANS, C. (2004):

Zulieferer auf der Gewinnerseite. In: Automobilproduktion - eine Branche im Umbruch.
Landsberg: Moderne Industrie 2004.

KANNETZKY, F. (2002):

Dilemmata der Kommunikationstheorie. In: Kommunikatives Verstehen – Leipziger Schriften zur Philosophie.

Leipzig: Leipziger Universitätsverlag 2002.

KARCHER, A.; BENDER, K. (2001):

PDM und Engineering Informationssysteme.

München: TU, itm, Vorlesungsskript 2001.

KEIJZER, W.; KREIMEYER, M.; SCHACK, R.; LINDEMANN, U.; ZÄH, M. (2006):

Vernetzungsstrukturen in der Digitalen Fabrik.

München: Verlag Dr. Hut 2006.

KELLNER, P.; MEIBNER, M.; MÜLLER, A. (1999):

Integration von CAx-Produktstrukturen – PDM-System als Vorbereitung für virtuelle Produktentwicklung. In: Verkürzte Entwicklungsprozesse durch Integration von Gestaltung und Berechnung.

Düsseldorf: VDI-Verlag 1999 (VDI-Berichte 1487).

KLEINER, S. (2003):

Föderatives Informationsmodell zur Systemintegration für die Entwicklung mechatronischer Produkte.

Aachen: Shaker-Verlag 2003 (zugl. Diss. TU Darmstadt 2003).

KLEEDÖRFER, R. (1999):

Prozeß- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung

Aachen: Shaker-Verlag 1999 (zugl. Diss. TU München 1998).

KLEMENT, R. (2005):

Agentenbasiertes Produktdatenmanagement.

Aachen: Shaker-Verlag 2005 (zugl. Diss. RWTH Aachen 2004).

KOJIMA, Y. (2000):

Mechanical CAE in Automotive Design. In: R&D Review of Toyota CDRL, Vol. 35, No. 4.

Tokio: Review of Toyota 2000.

KOKKOLARAS, M.; MOURELATOS, Z. P.; PAPALAMBROS P. Y. (2004):

Design Optimization of Hierarchically Decomposed Multilevel Systems under Uncertainty. In: Proceedings of DETC'04, ASME.

Salt Lake City: ASME 2004.

KOLK, O. (2005):

Reduziertes Berechnungsmodell für ein Kraftfahrzeug zur Auslegung der Karosserie hinsichtlich fahrdynamischer Zielgrößen.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2005 (zugl. Diss. TU Berlin 2005).

KOLLER, R. (1998):

Konstruktionslehre im Maschinenbau.

Berlin: Springer 1998.

KRASTEL, M. (2001):

STEP basiertes Simulationsdatenmanagement. Abschlussbericht zur Machbarkeitsstudie.

Darmstadt: TU, Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion 2001.

KRASTEL, M.; MERKT, T. (2002):

Integration der Simulation und Berechnung in eine PDM-Umgebung – die Arbeitsgruppe SimPDM. In: Produkt Daten Journal Nr. 2.

Darmstadt: ProSTEP iViP 2002.

KRAUSE, F.-L.; TRAC, T.; AHLE, U. (HRSG.) (2002):

Abschlussbericht Leitprojekt Integrierte Virtuelle Produktenstehung.

Karlsruhe: Hanser 2002.

KREIMEYER, M.; DEUBZER, F.; HERFELD, U.; LINDEMANN, U., (2005):

Holistic Integration of CAD and CAE: Analysis and Combination of Diverse Current Approaches. In: Proceedings of the 9th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology".

Antalya: TMT 2005.

KREIMEYER, M.; DEUBZER, F.; HERFELD, U.; DEQUIDT, C.; LINDEMANN, U., (2006A):

Function-driven Product Design in virtual Teams through methodical Structuring of Requirements and Components. In: Proceedings of the 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ASME-ESDA06), Torino, Italy, July 4-7, 2006.

Turin: ASME-ESDA 2006.

KREIMEYER, M.; HERFELD, U.; DEUBZER, F.; LINDEMANN, U. (2006B):

Effiziente Zusammenarbeit von Konstruktions- und Simulationsabteilungen in der Automobilindustrie. In: CiDaD-Working-Paper-Series.

Garching: Lehrstuhl für Produktentwicklung, TU München, 2006.

KRUMM, S. (2004):

Komplexe Systeme im Fahrzeugbau – Was kann Modularisierung leisten? In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Berichte 1846).

- KUSIAK, A. (1999):
Engineering design - products, processes and systems
San Diego: Academic Press 1999.
- LEE, K. Y.; PRICE, M.A.; ARMSTRONG, C.G.; LARSON, M.; SAMUELSSON, K. (2003):
CAD to CAE Integration through Automated Model Simplification and Adaptive Modeling. In: Proceedings of International Conference on Adaptive Modeling and Simulation. Barcelona: 2003.
- LEPPER, K.H. (2004):
Integrierte Virtuelle Produktenwicklung vom Entwurf bis zur Serienreife. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Berichte 1846).
- LINDEMANN, U. (2004A):
Marktnahe Produktion individualisierter Produkte.
München: Utz-Verlag 2004.
- LINDEMANN, U. (2004B):
Checklisten und andere Hilfsmittel zur systematischen Produktentwicklung und Konstruktion.
Garching: Lehrstuhl für Produktentwicklung, TU München 2004.
- LINDEMANN, U. (2005A):
CAD in der Produktentwicklung. Skriptum zur Vorlesung.
Garching: TU München 2005.
- LINDEMANN, U. (2007):
Methodische Entwicklung technischer Produkte.
Berlin: Springer 2005.
- LINDEMANN, U. MAURER, M. (2006):
Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte. In: Lindemann, U; Reichwald, R.; Zäh, M.F. (Hrsg.): Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion.
Berlin: Springer 2006.
- LINDEMANN, U.; ZÄH, M. (2004):
Montageautomatisierung durch Integration von Konstruktion und Planung. Transferbereich 29: Arbeits- und Ergebnisbericht.
Garching: Lehrstuhl für Produktentwicklung, TU München, 2004.

LISCHKE, R.; WILDE, H.-D. (2004):

Der Entwicklungsprozess von der virtuellen Funktionsauslegung zur konstruktiven Umsetzung am Beispiel des neuen Audi A6. In: Entwicklungen im Karosseriebau. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Berichte 1833)

LÖFFEL, C. (1997):

Integration von Berechnungswerkzeugen in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess. Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Fakultät für Maschinenbau. Erlangen-Nürnberg: Univ. Diss. 1997.

LUND, C.; BEYER, B.; MAISTER, W.; GIFFHORN, U.; MÜLLER, J. (2004):

Ganzheitliche Betrachtung der Motorkühlung durch entwicklungsübergreifende Integration von Versuch und Berechnung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Berichte 1846).

MAIER, A.M.; KREIMEYER, M.; HERFELD, U.; DEUBZER, F.; LINDEMANN, U.; CLARKSON, J. (2006):

Reflecting communication: a key factor for successful collaboration between embodiment design and simulation. Dubrovnik: Design 2006.

MALIK, F. (2003):

Strategie des Managements komplexer Systeme. Bern: Haupt-Verlag 2003.

MARKWORTH, R. (2003):

Entwicklungsbegleitendes Digital Mock-Up im Automobilbau. Aachen: Shaker-Verlag 2003 (zugl. Diss. TU Berlin 2002).

MAST, C. (2000):

Effektive Kommunikation für Manager: Informieren, diskutieren, überzeugen. Landsberg: Moderne Industrie 2000.

MAURER, M.; PULM, U.; BALLESTREM, F.; CLARKSON, J.; LINDEMANN, U. (2006):

The Subjective Aspects of Design Structure Matrices - Analysis of Comprehension and Application and Means to Overcome Differences. In: Proceedings of the 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ASME-ESDA06), Torino, Italy, July 4-7, 2006. Turin: ASME-ESDA 2006.

MCCORD, K. R.; EPPINGER, S.D. (1993):

Managing the Conceptual Design Activity of interdisciplinary Teams. Boston: Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management 1993.

- McMAHON, C.A.; LIU, Y.; CROSSLAND, R.; BROWN, D.; LEAL, D.; DEVLUKIA, J. (2003):
A best practice advice system to support automotive engineering analysis processes. In: Engineering with Computers, 19.
London: Springer-Verlag 2003.
- MELCHINGER, A.; SCHMITZ, E.-U. (2003):
Schneller und effizienter in der Entwicklung durch Simulation und Optimierung. In: Tagungsband zum Symposium Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung.
Bremen: Fraunhofer-Institut IFAM 2003.
- MELNIK, S. (1997):
Distributed Workflow Management.
Leipzig: Universität, Institut für Informatik, 1997.
- MENDGEN, R. (1999):
Methodische Vorgehensweise zur Modellierung in parametrischen und featurebasierten 3D-CAD-Systemen.
Aachen: Shaker-Verlag 1999 (zugl.: Diss. TU Darmstadt 1998).
- MENDOCA, F. (2006):
CAD Embedding and Integration Analysis of CFD and Electromagnetic Simulation. In: Development of best Practices and Identification of breakthrough Technologies in Automotive Engineering Simulation – Autosim.
Barcelona: NAFEMS 2006.
- MERKT, T.; KRASTEL, M. (2006):
Virtuelle Produktabsicherung auf Basis eines CAE-Datenmanagements. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2006 (VDI-Berichte 1967.1).
- MOCKO, G. M.; FENVES, S. J. (2003):
A Survey of Design-Analysis Integration Issues.
Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology 2003.
- MÜHLBAUER, R. (2002):
Virtuelle Auslegung und Absicherung strukturmechanischer Fahrwerksfunktionen. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2002 (VDI-Berichte 1701).
- MÜLLER, B. F.; STOLP, P. (1999):
Workflow-Management in der industriellen Praxis. Vom Buzzword zum Hightech-Instrument
Berlin: Springer 1999.

- MÜLLER, F. (2006):
Intuitive digitale Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen.
München: Shaker-Verlag 2006 (zugl.: Diss. TU München 2006).
- MÜLLER, K. (1995):
Management für Ingenieure.
Berlin: Springer 1995.
- NIERMEYER, R. (2001):
Teamarbeit: Führen und Erfolge sichern.
Freiburg: Rudolf-Haufe-Verlag 2001.
- NYSTRÖM, M.; LARSSON, T.; KARLSSON, L.; KOKKOLARAS, M.; PAPALAMBROS, P. Y. (2003):
Linking Analytical Target Cascading to Engineering Information Systems for Simulation-Based Optimal Vehicle Design.
Stockholm: ICED 2003.
- O'DONOVAN, B.; ECKERT, C.; CLARKSON, J. (2004):
Simulating design processes to increase managers' understanding.
Dubrovnik: Design 2004.
- OSTLE, A.-W. (2001):
Design. In: Vieweg Handbuch zur Kraftfahrzeugtechnik.
Braunschweig: Vieweg 2001.
- PAETZOLD, K. (2006):
Ansätze für eine funktionale Repräsentation multidisziplinärer Produkte. In: 17: Symposium "Design for X".
Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen 2006.
- PAHL, G.; BEITZ, W. (2003):
Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung.
Berlin: Springer 2003.
- PATZAK, G. (1982):
Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme.
Berlin: Springer 1982.
- PICOT, A.; REICHWALD, R.; WIGAND, R. T. (2001):
Die grenzenlose Unternehmung: Information, Organisation und Management.
Wiesbaden: Gabler-Verlag 2001.

PIMMLER, T. U.; EPPINGER, S. D. (1994):

Integration Analysis of Product Decompositions. In: ASME Design Theory and Methodology Conference.
Minneapolis: ASME 1994.

PLIESKE, M.; GIERLICH, K.; ROHER, A. (2004):

Das ZF-Berechnungsportal - eine konzernweite Plattform zur breiteren Nutzung der Berechnung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Berichte 1846).

PLÜMER, O. (2000):

Methodik zur Verbesserung der Bereitstellung von gestalt- und funktionsbezogenen Informationen für den Produktentwicklungsprozess.
Düsseldorf: VDI 2000 (zugl.: Diss. GH Paderborn 2000).

PULM, U. (2004):

Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung.
München: Verlag Dr-Hut 2004 (zugl.: Diss. TU München 2004).

RANGAN, R. M.; RHODE, S. M.; RUSSELL, P.; CHADA, B.; PLAMEN, B. (2005):

Streamlining Product Lifecycle Processes: A Survey of Product Lifecycle Management Implementations, Directions and Challenges. In: Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 5.
New York: ASME 2005.

RAPP, T. (1999):

Produktstrukturierung - Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen.
Wiesbaden: Gabler-Verlag 1999 (zugl.: Diss Universität St. Gallen 1999).

REICHENEDER, J.; GRUBER, K.; WIRCH, W.; MAYER, S. (2006):

Datenmanagement, Prozessunterstützung und CAx-Integration der Berechnung bei Audi.
In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2006 (VDI-Berichte 1967.1).

REICHWALD, R.; MÖSLEIN, K.; SACHENBACHER, H.; ENGLBERGER, H.; OLDENBURG, S. (1998):

Telekooperation – Verteilte Arbeits- und Organisationsformen.
Berlin: Springer-Verlag 1998.

REINHART, G.; MILBERG, J. (HRSG.)(1996):

EDM – Engineering Data Management, Nr. 24.
München: iw, Herbert Utz Wissenschaft 1996.

ROTH, K. (1994):

Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Band II Konstruktionskataloge.
Berlin: Springer-Verlag 1994.

SALUSTRI, F. A.; PARMAR, J. (2004):

Product design schematics: Structured diagramming for requirements engineering.
Dubrovnik: Design 2004.

SANDFORT, M.; KLEINE TRIMPE, B. (2004):

Virtuelle Funktionsauslegung am Beispiel des Chrysler Crossfire. In: Entwicklungen im Karosseriebau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Berichte 1833).

SAPUAN, S. M.; OSMAN, M.R.; NUKMAN, Y. (2006):

State of the Art of the Concurrent Engineering Technique in the Automotive Industry. In: Journal of Engineering Design, Vol. 17, No. 2, April 2006.
Abingdon: Taylor and Francis 2006.

SAUTER, J. (1999):

Integrierte Topologie und Gestaltoptimierung in der virtuellen Produktentstehung.
Weimar: Deutsche MSC User Konferenz am 21. und 22. Juni 1999.

SAUTER, J.; LAUBER, B.; HÄUBLER, P.; VIEKER, D. (2003):

Structural Optimization – Integration and Gaps in Workflows of Numerical Simulation Processes. In: NAFEMS Seminar “Integration of Numerical Simulation into the Development Process”.
Wiesbaden: NAFEMS 2003.

SCHARF, A. (1999):

Virtuelle vorgefühlt. In: Automobilindustrie Special, Innenausstattung.
Würzburg: Vogel Auto Medien (1999).

SHELKLE, E.; ELSENHANS, H. H. (2000):

Integration innovativer CAE-Werkzeuge in die PKW-Konzeptentwicklung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2000 (VDI-Berichte 1559).

SCHICHEL, M. (2002):

Produktdatenmodellierung in der Praxis.
München: Hanser 2002.

- SCHITTY, S. U.; SCHOPF, K. D. (2006):
Globale Kommunalitäten - Ein Schlüssel zum Erfolg. In: Complexity Management Journal, Ausgabe 2/2006.
Aachen: Schuh Komplexitätsmanagement 2006.
- SCHLACHT, T. (2001):
Simulationsintegration in allen Phasen des Produktentwicklungsprozesses bei dynamisch/hybriden Problemstellungen.
Essen: Universität, Diss. 2001.
- SCHLENKRICH, M.; HÄGELE, J.; STREIT, M.; KUSCHFELDT, S.; HÄNLE, U.; KROPP, A. (2000):
Das Projekt CAE-Bench: Ein Web-basiertes Daten-, Dokumentations- und Informationssystem.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2000 (VDI-Berichte 1559).
- SCHNEIDER, K. (2003):
Die zuverlässige Ausführung von Workflows. Eine komponentenbasierte Fehler- und Ausnahmebehandlung.
Stuttgart: Universität, Diss. 2003.
- SCHÖN, S. (2000):
Gestaltung und Unterstützung von Community of Practice.
München: Utz 2000 (zugl. Diss. TU München 2000).
- SCHÖTTL, C.; HINTEREDER, J.; BREITLING, U. (2004):
CAD-integrierte Berechnung, Anwendererfahrung beim Vergleich mit klassischer FEA.
In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Berichte 1846).
- SCHÖTTNER, J. (1999):
Produktdatenmanagement in der Fertigungsindustrie
München: Hanser 1999.
- SCHOTT, H.; COSTA, C.; BÜTTNER, K.; BIRKHOFFER, H. (1996):
Informations-Ressourcen-Management in der Produktentwicklung am Beispiel hypermedialer Werknormen. In: Dangelmeier, W., Gausemaier, J (Hrsg.): Fortgeschrittene Informationstechnologie in der Produktentwicklung.
Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 1996.
- SCHUMACHER, A.; BRUNIER, F. (2000):
Crash Optimierung unter Einbeziehung weiterer, fachübergreifender Strukturanforderungen. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2000 (VDI-Berichte 1559).

- SCHUMACHER, A.; MERKEL, M.; HIEROLD, R. (2002):
Parametrisierte CAD-Modelle als Basis für eine CAE-gesteuerte Komponentenentwicklung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2002 (VDI-Berichte 1701).
- SCHWANKL, L. (2002):
Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung.
München: Verlag Dr. Hut 2002 (zugl. Diss. TU München 2002).
- SEIDEMANN, H. (2001):
Entwicklung eines Informationssystems für das Kooperative Produktengineering.
Hannover: Universität Diss. 2001.
- SEKOLEC, R. (2005):
Produktstrukturierung als Instrument des Variantenmanagements in der methodischen Entwicklung modularer Produktfamilien.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2005 (zugl. Diss. ETH Zürich 2005).
- SESSA, V.I.; HANSEN, M.C.; PRESTRIDGE, S.; KOSSLER, M.E. (1999):
Geographically dispersed Teams: an annotated Bibliography.
Greensboro: Center for Creative Leadership 1999.
- SHANNON, C. E.; WEAVER, W. (1949):
The Mathematical Theory Of Communication.
Urbana: The University of Illinois Press 1949.
- SHOOTER, S. B.; KEIROUZ, W. T.; SZYKMAN, S.; FENVES, S. (2000):
A Model for Information Flow in Design. In: Proceedings of DETC 2000, ASME International Design Engineering Technical Conferences (DETC) 2000.
Baltimore: ASME 2000.
- SIEPKER, A. (2006):
Modulare Produktentwicklung im Automobilbau. Skriptum zur Vorlesung Ausgewählte Kapitel der Fahrzeugtechnik aus Sicht der Industrie
Garching: TU München 2006.
- SPUR, G.; KRAUSE, F.-L. (1997):
Das virtuelle Produkt.
München: Hanser 1997.
- STEINBRINK, O. (1999):
Integration der adaptiven Finite-Elemente-Methode in die Konstruktion.
Erlangen: Universität Diss. 1999.

- STEINBUCH, R. (1998):
Finite Elemente - ein Einstieg.
Berlin: Springer 1998.
- STEINMEIER, E. (1999):
Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der PKW-Entwicklung.
München: Shaker-Verlag 1999 (zugl. Diss. TU München 1998).
- STEWART, D.V. (1981):
The Design Structure Matrix: A Method for Managing the Design of Complex Systems.
In: IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. EM 28, Nr. 3.
Newark: IEEE 1981.
- STORATH, E. (1996):
Kontextsensitive Wissensbereitstellung in der Konstruktion.
Erlangen: Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen 1996.
- STRICKER, R. (1996):
Erfahrungen auch aus Simulation und Erprobung in der Produktentwicklung konsequent sammeln und nutzen: "Know-how-Recycling" mit neuronalen Netzen. In: Berechnung im Automobilbau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1996 (VDI-Berichte 1283).
- TARATOUKHINE, V.; BECHKOUM, K. (1999):
Mismatch Detection in Distributed Computer Aided Geometric Design. In: Proceedings of International Conference On Computer Graphics & Vision, GraphiCon'99, Moskau, 1999.
Moskau: 1999.
- TAWIL, M. (1999):
Künstliche neuronale Netze – Methoden und Anwendung. In: IMW Institutsmitteilungen Nr. 24.
Clausthal: TU, 1999.
- TECKLENBURG, G. (2004):
Die parametrisch-assoziative Konstruktionsmethodik in der Karosserieentwicklung und deren Auswirkungen auf die Hochschullehre. In: Entwicklungen im Karosseriebau.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Berichte 1833).
- TITTMANN, P. (2003):
Graphentheorie – Eine anwendungsorientierte Einführung.
Leipzig: Hanser Verlag 2003.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. (2000):

Product Design and Development.
Boston: McGraw-Hill 2000.

VERBAND DER DEUTSCHEN AUTOMOBILINDUSTRIE (HRSG.) (2006A):

Auto Jahresbericht 2006.
Frankfurt: VDA 2006.

VERBAND DER DEUTSCHEN AUTOMOBILINDUSTRIE (HRSG.) (2006B):

Materialien zur Automobilindustrie: Future Automotive Industry Structure (FAST) 2015 –
die neue Arbeitsteilung in der Automobilindustrie.
Frankfurt: VDA 2006.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.) (1980):

VDI-Richtlinie 2211: Methoden und Hilfsmittel – Aufgabe, Prinzip und Einsatz von In-
formationssystemen.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1980.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.) (1993):

VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme
und Produkte.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.) (1993):

VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.) (1999):

Informationsverarbeitung in der Konstruktion '99: Beschleunigung der Produktentwick-
lung durch EDM-/PDM- und Featuretechnologie.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1999 (VDI-Berichte 1497).

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.) (2003):

VDI-Richtlinie 2218: Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Feature
Technologie.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.) (2004):

VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.
Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.

VERGEEST, J.; HORVATH, I. (2001):

Where Interoperability ends. In: Proceedings of DETC '01, 2001 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, September 9 - 12, 2001.

Pittsburgh: ASME 2001.

VIEHWEGER, B; SIMON, S.; WAGNER, L.; BERG, A. (2002):

Aluminium – Stahl – Verbundblech. In: Entwicklungen im Karosseriebau.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2002 (VDI-Berichte 1674).

VOLZ, K.; DIRSCHMID, F.; DUDDECK, F. (2006):

Optimierung der Crasheigenschaften von Rohkarosserien in der frühen Phase der Produktentwicklung. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2006 (VDI-Berichte 1967.1).

WAGNER, T.; GÖHNER, P. (2005):

Aufbau von Agentensystemen zur Unterstützung komponentenbasierter Entwicklungsprozesse. In: it - Information Technology 47 (2005) 1.

Oldenburg: Oldenburg-Verlag 2005.

WALTHER, C. (1994):

Systemtechnische Verfahren zur Bestimmung der Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Funktionsstruktur technischer Systeme.

München: TU, Fakultät für Maschinenwesen, Diss. 1994.

WARTZACK, S.; MEERKAMM, H. (1999):

Durchgängige Rechnerunterstützung in der Produktentwicklung durch den Einsatz semantisch hochwertiger Features. In: Beschleunigung der Produktentwicklung durch EDM/PDM- und Feature-Technologie.

Düsseldorf: VDI-Verlag 1999 (VDI-Berichte 1497).

WECK, M.; KRATZ, M. (1999):

Produktübergreifende Integration bei Werkzeugmaschinen. In: Verkürzte Entwicklungsprozesse durch Integration von Gestaltung und Berechnung.

Düsseldorf: VDI-Verlag 1999 (VDI-Berichte 1487).

WEHLITZ, P. (2000):

Nutzenorientierte Einführung eines Produktdatenmanagement-Systems.

München: TU, Fakultät für Maschinenwesen, Diss. 2000.

WEHNER, P. (2003):

Ein Ansatz zur feature- und produktmodellbasierten Integration von CAD und FEA.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2003 (zugl. Diss. Uni. Magdeburg 2003).

WEID, D.; NOACK, J.; SAUTER, J.; BANGERT, C. (2004):

Schnelle und kostengünstige Entwicklung eines Vorderachs-Radbremsenkonzept unter konsequenter Anwendung von CAE-Analysewerkzeugen und innovativen Optimierungsmethoden. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau.

Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (VDI-Berichte 1846).

WENDT, S. (1998):

Der Zustandsbegriff in der Systemtheorie. Interner Bericht.

Kaiserslautern: Technische Universität 1998.

WIKIPEDIA. (2006A):

Wikipedia, the free Encyclopedia.

Entnommen am 27.11.2006, URL http://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_intelligence.

WIKIPEDIA. (2006B):

Wikipedia, die freie Enzyklopädie.

Entnommen am 27.11.2006, URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Wrapper>.

WIKIPEDIA. (2007):

Wikipedia, die freie Enzyklopädie.

Entnommen am 04.01.2007, URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Segment>.

WÖLFLE, F. (1998):

Virtuelle Berechnungskompetenzzentren als Dienstleister zur Integration von Gestaltung und Berechnung.

Düsseldorf: VDI-Verlag (zugl. TU Berlin, Diss. 1998).

ZÄH, M.; REINHART, G. (2003):

Rechnerintegrierte Produktion.

München: TU, iw, Vorlesungsskript 2003.

ZEUGTRÄGER, K. (1998):

Anlaufmanagement für Großanlagen.

Düsseldorf: VDI-Verlag 1998 (zugl. Diss. Uni. Hannover 1997).

9. Anhang

9.1 Fragebogen zur Anwenderbefragung in der Konstruktion und Simulation

Im Folgenden ist der Fragebogen zur effizienten Zusammenarbeit von Konstruktion und Berechnung abgedruckt, der unter Fahrzeugherstellern, Zulieferern und anderen Branchen (Maschinenbau) im April und Mai 2005 durchgeführt wurde⁵⁵ und dessen Auswertung im Kapitel 3.1.1 erläutert und interpretiert wird. Die Antworten bei den Fahrzeugherstellern und Zulieferern stammen von Ingenieuren aus der Konstruktion und der Simulation in der Karosserieentwicklung aus allen Hierarchieebenen, sowohl leitende Angestellte als auch Konstruktions- und Berechnungsingenieure haben den Fragebogen beantwortet, so dass die unterschiedlichen Perspektiven - Sachbearbeiter und Management - repräsentiert sind. Neben der rein statistischen Auswertung über die Anzahl der Nennungen ist es besonders interessant und aufschlussreich, die Kommentare in den Bemerkungsfeldern auszuwerten, die zwar keine statistische Größe ergeben, jedoch häufig auf die realen Schwierigkeiten und Potentiale im Entwicklungsprozess hinweisen. Bei einigen Fragen waren die Kommentare annähernd deckungsgleich, so dass daraus wieder Rückschlüsse gezogen werden können, welche Handlungsfelder der CAD-CAE-Integration aus der Sicht der Anwender besonders wichtig sind. Somit konnten die Kommentare der Befragten ebenfalls in die Auswertung aufgenommen werden und sind z. T. in Kapitel 3.1.1 enthalten.

⁵⁵ Auf den Abdruck der Seite Acht wurde verzichtet, da sie lediglich eine Danksagung und die Adresse zur Rücksendung enthält.

LEHRSTUHL FÜR PRODUKTENTWICKLUNG
Technische Universität München
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Fragebogen zur effizienten Zusammenarbeit von Konstruktion und Berechnung in der Produktentwicklung

Dieser Fragebogen wird von den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Produktentwicklung der TU München ausgewertet und dient der Analyse von Prozessen bei der Zusammenarbeit zwischen Konstruktion und Berechnung. Zusätzlich unterstützt er die Identifikation von Handlungsfeldern und Verbesserungspotenzialen bei der Integration von Konstruktion und Berechnung.

Die Ergebnisse des Fragebogens fließen in die Projektarbeit des Lehrstuhls im Rahmen der Forschung zur Effizienz von Entwicklungsprozessen ein.

1. Projekt / Prozess:

1.1: In welchen Phasen der Produktentwicklung ist Ihre Abteilung tätig?

Vorentwicklung Konzeptentwicklung Serienentwicklung

1.2: Wer startet in Ihrem Verantwortungsbereich mit der Produktentwicklung?

Konstruktion Berechnung K&B zeitgleich Sonstiges

Bemerkungen:

1.3: Wenn die Berechnung vor der Konstruktion im Produktentwicklungsprozess startet, woher stammen die Modelle für die Berechnung?

Vorgängerprojekt (Skalierung) Geometrie in der Berechnung erzeugt Sonstiges

Bemerkungen:

1.4: Werden in frühen Phasen die weniger detaillierten Grundgeometrien der Konstruktion an die Berechnung übergeben?

Ja

Nein, nicht sinnvoll

Nein, wäre aber sinnvoll

1.5: Wer ist zuständig für die Umsetzung der funktionalen Ziele des **Gesamtproduktes** gemäß Lasten-/Pflichtenheft?

Konstruktion

Berechnung

Projektkoordination

Zulieferer

Sonstige

Bemerkungen:

1.6: Wer ist zuständig für die Umsetzung der funktionalen Ziele der **Komponenten/Baugruppen** des Gesamtprodukts gemäß Lasten-/Pflichtenheft?

Konstruktion

Berechnung

Projektkoordination

Zulieferer

Sonstige

Bemerkungen:

1.7: Werden in Ihrem Verantwortungsbereich Berechnungen mit im CAD-System integrierten FEM-Werkzeugen ausgeführt?

Ja zu 100%

Teilweise für einfache Lastfälle

Gar nicht

1.8: Sind die Berechnungsingenieure aus Ihrer Sicht immer ausreichend mit den notwendigen Informationen und Randbedingungen der Bauteile versorgt?

Ja

Nein

- wenn nicht, beeinflusst dies die Qualität der Ergebnisse?

Ja

Nein

Kann ich nicht beurteilen



1.9: Werden in Ihrem Verantwortungsbereich im CAD-System Vorarbeiten für die Berechnungen ausgeführt? Wenn nicht, welche wären evtl. sinnvoll als einfache Vorabschätzung?

Geometrievereinfachung Vernetzung Sonstiges

Bemerkungen:

1.10: Benutzen Konstruktion und Berechnung ein gemeinsames PDM-System?

Ja Nein, Konstruktion und Berechnung getrennt

Bemerkungen:

1.11: Gibt es in Ihrem Aufgabenbereich einen standardisierten Prozess zwischen Konstruktion und Berechnung, z. B. ein Auftragssystem der Konstruktion an die Berechnung oder einen Berechnungsbericht?

- wenn ja, bitte beschreiben Sie den vorhandenen Prozess:

- wenn nicht, halten Sie einen solchen Prozess für hilfreich?

Ja, wäre hilfreich Nein, ist zu unflexibel

*2. Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen, wenn Sie in der Konstruktion tätig sind (ansonsten gehen sie bitte zu **Teil 3** über):*

2.1: Welche CAD-Softwaresysteme setzen Sie in Ihrem Aufgabenbereich ein?

CATIA V4 CATIA V5 Pro/Engineer Unigraphics Andere

Bemerkungen:



2.2: Wie viele im Lastenheft des Bauteils, der Baugruppe oder des Gesamtprodukts geforderte Lastfälle bzgl. funktionaler Anforderungen werden mit numerischen o. ä. Berechnungsverfahren analysiert bzw. optimiert?

0%
 25%
 50%
 75%
 100%

Wenn nur 50% oder weniger numerisch analysiert werden, was sind die Gründe dafür?

2.3: Wäre ein einfaches konstruktionsnahes FEM-Verfahren sinnvoll, d. h. stünden Mehraufwand und Verantwortung in angemessenem Verhältnis zum Nutzen?

Ja
 Nein, nicht sinnvoll

2.4: Sind Sie von den Ergebnissen der Berechnung häufiger überrascht oder bestätigen sie lediglich Ihre Hypothesen?

Bestätigen meine Hypothesen
 Widersprechen häufiger meinen Hypothesen
 Überraschen mich meistens

2.5: In welcher Form erhalten Sie die Analyse- und Optimierungsergebnisse der Berechnung für Ihre Konstruktionen?

2.6: Wie arbeiten Sie die Analysen/Ergebnisse der Berechnung in Ihre Konstruktion mit ein?

Geometrie nachkonstruieren
 als Anregung für eigene Konstruktion
 Sonstiges

Bemerkungen:

2.7: Wäre es für Sie wünschenswert, wenn in der Berechnung optimierte Bauteilvarianten generiert würden, auf die Sie Zugriff hätten?

Ja
 Nein

2.8: Wäre es für Sie wünschenswert, wenn Sie optimierte Bauteilvarianten aus der Berechnung direkt ins CAD-System übertragen und die Daten ohne Überarbeitung weiterverwenden könnten?

Ja

Nein

3. Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen, wenn Sie in der Berechnung tätig sind (ansonsten gehen Sie bitte zu Teil 4 über):

3.1: Welche Softwaresysteme setzen Sie in Ihrem Aufgabenbereich hauptsächlich für die Berechnung ein?

- Präprozessoren/Vernetzung

ANSA

Medina

Patran

Andere

- Solver

MSC/Nastran

Abaqus

PamCrash

Ansys

Andere

- Postprozessoren

Animator

Medina

PamView

Patran

Andere

Bemerkungen:

3.2: Berechnen Sie nicht von der Konstruktion vorgegebene Varianten des Bauteils zwecks Optimierung? Wenn ja, wie viele?

Ja, immer

Gelegentlich

Nein

Würde ich gerne

Anzahl

Wenn ja, geben Sie diese als Verbesserungsvorschläge an die Konstruktion weiter?

Ja

Nein

Wenn Nein: Warum nicht?



3.3: Wird zur Simulation abhängig von der Entwicklungsphase ein anderer Detaillierungsgrad der Geometrie verwendet?

Ja

Nein, nicht sinnvoll

Nein, wäre aber sinnvoll

3.4: In welcher Form stellen Sie die Berechnungsergebnisse der Konstruktion zur Verfügung?

3.5: Gewähren Sie der Konstruktion vollen Zugriff auf die Berechnungsergebnisse?

Ja

Nein, nicht sinnvoll

Nein, wäre aber sinnvoll

4. Chancen und Verbesserungen:

4.1: Wie hoch schätzen Sie im Moment den Anteil an paralleler Tätigkeit von Konstruktion und Berechnung ein?

0 %

25%

50%

75%

100%

4.2: Sind sich Berechnung und Konstruktion in Ihrem Aufgabenbereich räumlich nahe oder sogar im selben Büro?

Ja

Nein, nicht sinnvoll

Nein, wäre aber sinnvoll

4.3: Arbeiten Berechnung und Konstruktion im gegenwärtigen Produktentwicklungsprozess effizient zusammen?

ja

nein

Warum bzw. warum nicht?

4.4: Wo liegt Ihrer Meinung nach der Schlüssel für eine erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen Berechnung und Konstruktion?

Ablauf

Kommunikation

Ergebnisrückführung

Daten

Anderes:

4.5: Wo sehen Sie den größten Integrationsbedarf?
(z. B. Abteilung, Aufgabenfeld, Datenhaltung, gemeinsame Zieldefinition)

4.6: Wo ließen sich schnell gute Erfolge einer Integration von CAD und CAE erzielen?
(Abteilung, Aufgabenfeld)

5. Allgemeiner Teil:

5.1: In welcher Branche ist Ihr Unternehmen tätig?

Automobilbau

Elektrotechnik

Informationstechnologie

Maschinenbau

Andere

In welcher Rolle ist Ihr Unternehmen tätig?

OEM

Zulieferer

5.2: Über wie viele Mitarbeiter verfügt Ihr Unternehmen?

Mitarbeiter insgesamt

davon in der F&E tätig

5.3: In welchem Funktionsbereich/ in welcher Position sind Sie tätig? Seit wie vielen Jahren arbeiten Sie dort schon?

(z. B. Funktionsbereich: Konstruktion – Position: Abteilungsleiter):

Funktionsbereich:

Position

Anzahl Jahre:



9.2 Auszüge aus der Bauteil-Lastfall-Matrix

Im folgenden Abschnitt werden die relevanten Bestandteile der Bauteil-Lastfall-Matrix gezeigt. Auf eine Darstellung der Bauteile wird nur exemplarisch eingegangen, da die Produktstruktur meist sehr firmenspezifisch ist und prinzipiell bereits ausführlich in Kapitel 5 erläutert wurde. Enthalten sind die für die Gesamtfahrzeugeigenschaften relevanten Teile des Fahrzeugs, die für die Karosserieberechnung benötigt werden. Dies sind die Innenausstattung (Cockpit, Sitze, Verkleidungen), die Rohkarosserie mit Türen und Klappen, das Fahrwerk und die Aggregate, sofern die Komponenten für die Simulation benötigt werden. Weiterhin sind elektrische Komponenten, wie Verkabelungen, Steuergeräte, etc., Bestandteil der Bauteil-Lastfall-Matrix. In Abbildung 9-1 ist ein Ausschnitt der Komponenten aus der Baugruppe Rohkarosserie dargestellt.

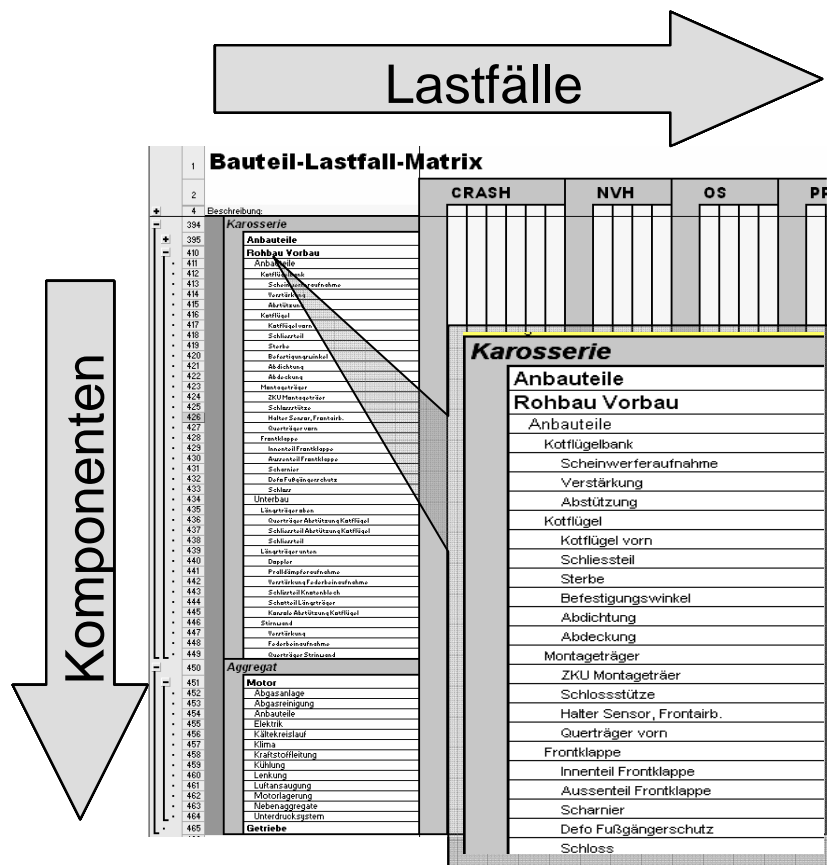


Abbildung 9-1: Komponentenstrukturierung in der Bauteil-Lastfall-Matrix

In Abbildung 9-2 sind die hauptsächlichen Lastfallgruppen gezeigt, Crash, NVH, OS (Insassenschutz) und PP (Fußgängerschutz) mit den, soweit vorhandenen, Subdisziplinen. Die einzelnen Subdisziplinen lassen sich weiter untergliedern in die einzelnen Lastfälle, wie am Bei-

spiel Insassenschutz Seitencrash in Abbildung 9-2 dargestellt ist. Dabei entspricht eine Zeile jeweils einem Lastfall (EuroNCAP, EG 96/79, etc.).

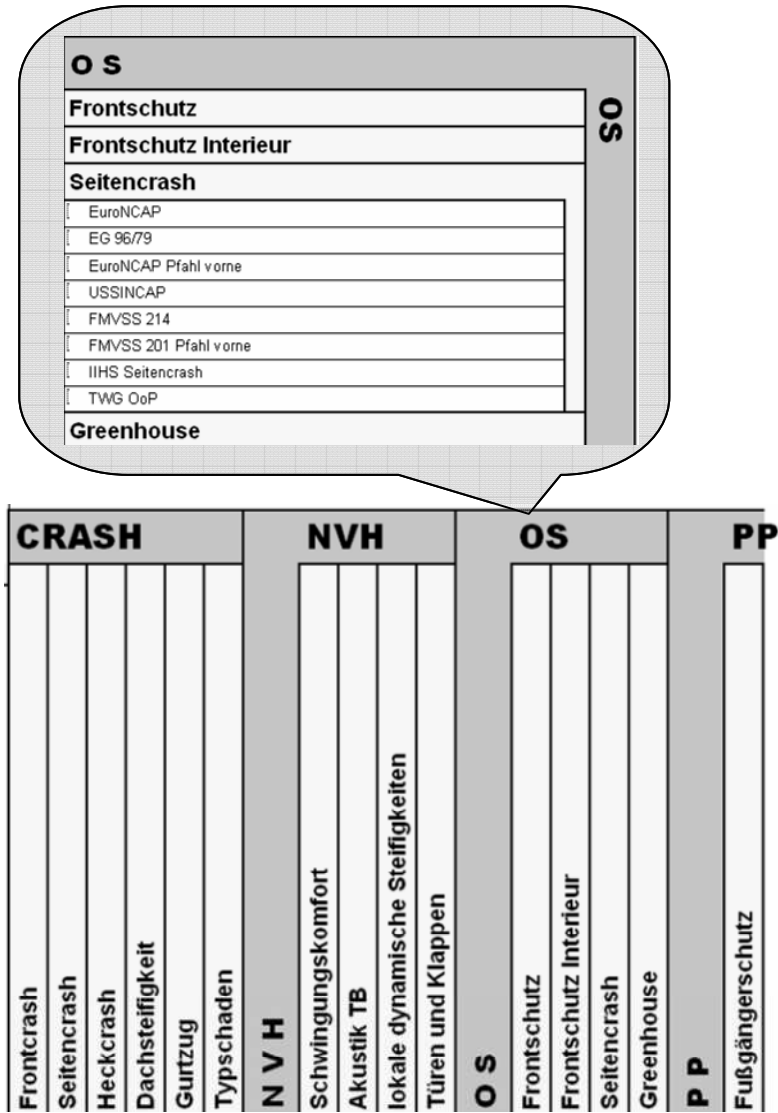


Abbildung 9-2: Hauptsächliche Lastfallgruppen der Bauteil-Lastfall-Matrix

10. Dissertationsverzeichnis des Lehrstuhls für Produktentwicklung

Lehrstuhl für Produktentwicklung
Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching
Dissertationen betreut von

- Prof. Dr.-Ing. W. Rodenacker,
- Prof. Dr.-Ing. K. Ehrlenspiel und
- Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

- D1 COLLIN, H.:
Entwicklung eines Einwalzenkalenders nach einer systematischen Konstruktionsmethode. München: TU, Diss. 1969.
- D2 OTT, J.:
Untersuchungen und Vorrichtungen zum Offen-End-Spinnen.
München: TU, Diss. 1971.
- D3 STEINWACHS, H.:
Informationsgewinnung an bandförmigen Produkten für die Konstruktion der Produktmaschine.
München: TU, Diss. 1971.
- D4 SCHMETTOW, D.:
Entwicklung eines Rehabilitationsgerätes für Schwerstkörperbehinderte.
München: TU, Diss. 1972.
- D5 LUBITZSCH, W.:
Die Entwicklung eines Maschinensystems zur Verarbeitung von chemischen Endlosfasern.
München: TU, Diss. 1974.
- D6 SCHEITENBERGER, H.:
Entwurf und Optimierung eines Getriebesystems für einen Rotationsquerschneider mit allgemeingültigen Methoden.
München: TU, Diss. 1974.
- D7 BAUMGARTH, R.:
Die Vereinfachung von Geräten zur Konstanthaltung physikalischer Größen.
München: TU, Diss. 1976.
- D8 MAUDERER, E.:
Beitrag zum konstruktionsmethodischen Vorgehen durchgeführt am Beispiel eines Hochleistungsschalter-Antriebs.
München: TU, Diss. 1976.
- D9 SCHÄFER, J.:
Die Anwendung des methodischen Konstruierens auf verfahrenstechnische Aufgabenstellungen.
München: TU, Diss. 1977.
- D10 WEBER, J.:
Extruder mit Feststoffpumpe – Ein Beitrag zum Methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1978.

- D11 HEISIG, R.:
Längencodierer mit Hilfsbewegung.
München: TU, Diss. 1979.
- D12 KIEWERT, A.:
Systematische Erarbeitung von Hilfsmitteln zum kostenarmen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1979.
- D13 LINDEMANN, U.:
Systemtechnische Betrachtung des Konstruktionsprozesses unter besonderer Berücksichtigung der Herstellkostenbeeinflussung beim Festlegen der Gestalt.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1980. (Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften Reihe 1, Nr. 60).
Zugl. München: TU, Diss. 1980.
- D14 NJOYA, G.:
Untersuchungen zur Kinematik im Wälzlager bei synchron umlaufenden Innen- und Außenringen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D15 HENKEL, G.:
Theoretische und experimentelle Untersuchungen ebener konzentrisch gewellter Kreisringmembranen.
Hannover: Universität, Diss. 1980.
- D16 BALKEN, J.:
Systematische Entwicklung von Gleichlaufgelenken.
München: TU, Diss. 1981.
- D17 PETRA, H.:
Systematik, Erweiterung und Einschränkung von Lastausgleichslösungen für Standgetriebe mit zwei Leistungswegen – Ein Beitrag zum methodischen Konstruieren.
München: TU, Diss. 1981.
- D18 BAUMANN, G.:
Ein Kosteninformationssystem für die Gestaltungsphase im Betriebsmittelbau.
München: TU, Diss. 1982.
- D19 FISCHER, D.:
Kostenanalyse von Stirnzahnrädern. Erarbeitung und Vergleich von Hilfsmitteln zur Kostenfrüherkennung.
München: TU, Diss. 1983.
- D20 AUGUSTIN, W.:
Sicherheitstechnik und Konstruktionsmethodiken – Sicherheitsgerechtes Konstruieren.
Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz 1985. Zugl. München: TU, Diss. 1984.
- D21 RUTZ, A.:
Konstruieren als gedanklicher Prozess.
München: TU, Diss. 1985.
- D22 SAUERMANN, H. J.:
Eine Produktkostenplanung für Unternehmen des Maschinenbaues.
München: TU, Diss. 1986.
- D23 HAFNER, J.:
Entscheidungshilfen für das kostengünstige Konstruieren von Schweiß- und Gussgehäusen.
München: TU, Diss. 1987.
- D24 JOHN, T.:
Systematische Entwicklung von homokinetischen Wellenkupplungen.
München: TU, Diss. 1987.
- D25 FIGEL, K.:
Optimieren beim Konstruieren.
München: Hanser 1988. Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Figel, K.: Integration automatisierter Optimierungsverfahren in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess.

Reihe Konstruktionstechnik München

- D26 TROPSCHUH, P. F.:
Rechnerunterstützung für das Projektieren mit Hilfe eines wissensbasierten Systems.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 1). Zugl. München: TU, Diss. 1988 u. d. T.: Tropschuh, P. F.: Rechnerunterstützung für das Projektieren am Beispiel Schiffsgetriebe.
- D27 PICKEL, H.:
Kostenmodelle als Hilfsmittel zum Kostengünstigen Konstruieren.
München: Hanser 1989. (Konstruktionstechnik München, Band 2). Zugl. München: TU, Diss. 1988.
- D28 KITSTEINER, H.-J.:
Die Auswahl und Gestaltung von kostengünstigen Welle-Nabe-Verbindungen.
München: Hanser 1990. (Konstruktionstechnik München, Band 3). Zugl. München: TU, Diss. 1989.
- D29 HILLEBRAND, A.:
Ein Kosteninformationssystem für die Neukonstruktion mit der Möglichkeit zum Anschluss an ein CAD-System.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 4). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D30 DYLLA, N.:
Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 5). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D31 MÜLLER, R.
Datenbankgestützte Teilverwaltung und Wiederholteilsuche.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 6). Zugl. München: TU, Diss. 1990.
- D32 NEESE, J.:
Methodik einer wissensbasierten Schadenanalyse am Beispiel Wälzlagerungen.
München: Hanser 1991. (Konstruktionstechnik München, Band 7). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D33 SCHAAL, S.:
Integrierte Wissensverarbeitung mit CAD – Am Beispiel der konstruktionsbegleitenden Kalkulation.
München: Hanser 1992. (Konstruktionstechnik München, Band 8). Zugl. München: TU, Diss. 1991.
- D34 BRAUNSPERGER, M.:
Qualitätssicherung im Entwicklungsablauf – Konzept einer präventiven Qualitätssicherung für die Automobilindustrie.
München: Hanser 1993. (Konstruktionstechnik München, Band 9). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D35 FEICHTER, E.:
Systematischer Entwicklungsprozess am Beispiel von elastischen Radialversatzkupplungen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 10). Zugl. München: TU, Diss. 1992.
- D36 WEINBRENNER, V.:
Produktlogik als Hilfsmittel zum Automatisieren von Varianten- und Anpassungskonstruktionen.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 11). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D37 WACH, J. J.:
Problemspezifische Hilfsmittel für die Integrierte Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 12). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D38 LENK, E.:
Zur Problematik der technischen Bewertung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 13). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D39 STUFFER, R.:
Planung und Steuerung der Integrierten Produktentwicklung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 14). Zugl. München: TU, Diss. 1993.

- D40 SCHIEBELER, R.:
Kostengünstig Konstruieren mit einer rechnergestützten Konstruktionsberatung.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 15). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D41 BRUCKNER, J.:
Kostengünstige Wärmebehandlung durch Entscheidungsunterstützung in Konstruktion und Härterei.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 16). Zugl. München: TU, Diss. 1993.
- D42 WELLNIAK, R.:
Das Produktmodell im rechnerintegrierten Konstruktionsarbeitsplatz.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 17). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D43 SCHLÜTER, A.:
Gestaltung von Schnappverbindungen für montagegerechte Produkte.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 18). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D44 WOLFRAM, M.:
Feature-basiertes Konstruieren und Kalkulieren.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 19). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D45 STOLZ, P.:
Aufbau technischer Informationssysteme in Konstruktion und Entwicklung am Beispiel eines elektronischen Zeichnungsarchives.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 20). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D46 STOLL, G.:
Montagegerechte Produkte mit feature-basiertem CAD.
München: Hanser 1994. (Konstruktionstechnik München, Band 21). Zugl. München: TU, Diss. 1994.
- D47 STEINER, J. M.:
Rechnergestütztes Kostensenken im praktischen Einsatz.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 22). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D48 HUBER, T.:
Senken von Montagezeiten und -kosten im Getriebebau.
München: Hanser 1995. (Konstruktionstechnik München, Band 23). Zugl. München: TU, Diss. 1995.
- D49 DANNER, S.:
Ganzheitliches Anforderungsmanagement für marktorientierte Entwicklungsprozesse.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 24). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D50 MERAT, P.:
Rechnergestützte Auftragsabwicklung an einem Praxisbeispiel.
Aachen: Shaker 1996. (Konstruktionstechnik München, Band 25). Zugl. München: TU, Diss. 1996 u. d. T.:
MERAT, P.: Rechnergestütztes Produktleitsystem
- D51 AMBROSY, S.:
Methoden und Werkzeuge für die integrierte Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1997. (Konstruktionstechnik München, Band 26). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D52 GIAPOLIS, A.:
Modelle für effektive Konstruktionsprozesse.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 27). Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- D53 STEINMEIER, E.:
Realisierung eines systemtechnischen Produktmodells – Einsatz in der Pkw-Entwicklung
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 28). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D54 KLEEDÖRFER, R.:
Prozess- und Änderungsmanagement der Integrierten Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 29). Zugl. München: TU, Diss. 1998.

- D55 GÜNTHER, J.:
Individuelle Einflüsse auf den Konstruktionsprozess.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 30). Zugl. München: TU, Diss. 1998.
- D56 BIERSACK, H.:
Methode für Kraftleinleitungsstellenkonstruktion in Blechstrukturen.
München: TU, Diss. 1998.
- D57 IRLINGER, R.:
Methoden und Werkzeuge zur nachvollziehbaren Dokumentation in der Produktentwicklung.
Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 31). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D58 EILETZ, R.:
Zielkonfliktmanagement bei der Entwicklung komplexer Produkte – am Bsp. PKW-Entwicklung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 32). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D59 STÖSSER, R.:
Zielkostenmanagement in integrierten Produkterstellungsprozessen.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 33). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D60 PHLEPS, U.:
Recyclinggerechte Produktdefinition – Methodische Unterstützung für Upgrading und Verwertung.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 34). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D61 BERNARD, R.:
Early Evaluation of Product Properties within the Integrated Product Development.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 35). Zugl. München: TU, Diss. 1999.
- D62 ZANKER, W.:
Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden.
Aachen: Shaker 1999. (Konstruktionstechnik München, Band 36). Zugl. München: TU, Diss. 1999.

Reihe Produktentwicklung München

- D63 ALLMANSBERGER, G.:
Erweiterung der Konstruktionsmethodik zur Unterstützung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 37). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D64 ASSMANN, G.:
Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 38). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D65 BICHLMAIER, C.:
Methoden zur flexiblen Gestaltung von integrierten Entwicklungsprozessen.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 39). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D66 DEMERS, M. T.:
Methoden zur dynamischen Planung und Steuerung von Produktentwicklungsprozessen.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 40). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D67 STETTER, R.:
Method Implementation in Integrated Product Development.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 41). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D68 VIERTLBÖCK, M.:
Modell der Methoden- und Hilfsmittelführung im Bereich der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2000. (Produktentwicklung München, Band 42). Zugl. München: TU, Diss. 2000.

- D69 COLLIN, H.:
Management von Produkt-Informationen in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 43). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D70 REISCHL, C.:
Simulation von Produktkosten in der Entwicklungsphase.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 44). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D71 GAUL, H.-D.:
Verteilte Produktentwicklung - Perspektiven und Modell zur Optimierung.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 45). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D72 GIERHARDT, H.:
Global verteilte Produktentwicklungsprojekte – Ein Vorgehensmodell auf der operativen Ebene.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 46). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D73 SCHOEN, S.:
Gestaltung und Unterstützung von Community of Practice.
München: Utz 2000. (Produktentwicklung München, Band 47). Zugl. München: TU, Diss. 2000.
- D74 BENDER, B.:
Zielorientiertes Kooperationsmanagement.
München: Dr. Hut 2001. (Produktentwicklung München, Band 48). Zugl. München: TU, Diss. 2001.
- D75 SCHWANKL, L.:
Analyse und Dokumentation in den frühen Phasen der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 49). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D76 WULF, J.:
Elementarmethoden zur Lösungssuche.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 50). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D77 MÖRTL, M.:
Entwicklungsmanagement für langlebige, upgradinggerechte Produkte.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 51). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D78 GERST, M.:
Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2002. (Produktentwicklung München, Band 52). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D79 AMFT, M.:
Phasenübergreifende bidirektionale Integration von Gestaltung und Berechnung.
München: Dr. Hut 2003. (Produktentwicklung München, Band 53). Zugl. München: TU, Diss. 2002.
- D80 FÖRSTER, M.:
Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus.
München: TU, Diss. 2003.
- D81 GRAMANN, J.:
Problemmodelle und Bionik als Methode.
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 55). Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D82 PULM, U.:
Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2004. (Produktentwicklung München, Band 56). Zugl. München: TU, Diss. 2004.
- D83 HUTTERER, P.:
Reflexive Dialoge und Denkbausteine für die methodische Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 57). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D84 FUCHS, D.:
Konstruktionsprinzipien für die Problemanalyse in der Produktentwicklung.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 58). Zugl. München: TU, Diss. 2005.

- D85 PACHE, M.:
Sketching for Conceptual Design.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 59). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D86 BRAUN, T.:
Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld.
München: Dr. Hut 2005. (Produktentwicklung München, Band 60). Zugl. München: TU, Diss. 2005.
- D87 JUNG, C.:
Anforderungsklä rung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 61). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D88 HEBLING, T.:
Einführung der Integrierten Produktpolitik in kleinen und mittelständischen Unternehmen.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 62). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D89 STRICKER, H.:
Bionik in der Produktentwicklung unter der Berücksichtigung menschlichen Verhaltens.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 63). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D90 NIBL, A.:
Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 64). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D91 MÜLLER, F.:
Intuitive digitale Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen.
München: Dr. Hut 2007. (Produktentwicklung München, Band 65). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D92 ERDELL, E.:
Methodenanwendung in der Hochbauplanung – Ergebnisse einer Schwachstellenanalyse.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 66). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D93 GAHR, A.:
Pfadkostenrechnung individualisierter Produkte.
München: Dr. Hut 2006. (Produktentwicklung München, Band 67). Zugl. München: TU, Diss. 2006.
- D94 RENNER, I.:
Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil.
TU München: 2006. (als Dissertation eingereicht)
- D95 PONN, J.:
Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte.
München: TU, Diss. 2007.
- D96 HERFELD, U.:
Matrix-basierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und numerischer Simulation.
TU München: 2007. (als Dissertation eingereicht)
- D97 SCHNEIDER, S.:
Model for the evaluation of engineering design methods.
TU München: 2007. (als Dissertation eingereicht)
- D98 FELGEN, L.:
Systemorientierte Qualitätssicherung für mechatronische Produkte.
TU München: 2007. (als Dissertation eingereicht)
- D99 GRIEB, J.:
Auswahl von Werkzeugen und Methoden für verteilte Produktentwicklungsprozesse.
TU München: 2007. (als Dissertation eingereicht)