

Reihe Informationsmanagement im  
Engineering Karlsruhe

Roland Mayer-Bachmann

**Integratives  
Anforderungsmanagement**

Konzept und Anforderungsmodell  
am Beispiel der Fahrzeugentwicklung

Band 2 – 2007



universitätsverlag karlsruhe



Roland Mayer-Bachmann

## **Integratives Anforderungsmanagement**

**Konzept und Anforderungsmodell am Beispiel der Fahrzeugentwicklung**

**Reihe Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe  
Band 2 – 2007**

Herausgeber

Universität Karlsruhe (TH)

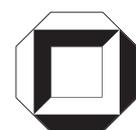
Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen (IMI)

o. Prof. Dr. Dr.-Ing. Jivka Ovtcharova

# **Integratives Anforderungsmanagement**

Konzept und Anforderungsmodell  
am Beispiel der Fahrzeugentwicklung

von  
Roland Mayer-Bachmann



---

universitätsverlag karlsruhe

Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau, 2007

## Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe  
c/o Universitätsbibliothek  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe  
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz  
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2008  
Print on Demand

ISSN: 1860-5990  
ISBN: 978-3-86644-194-1





# Integratives Anforderungsmanagement

Konzept und Anforderungsmodell  
am Beispiel der Fahrzeugentwicklung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau der  
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Roland Mayer-Bachmann

aus Ingelheim

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Juli 2007

Hauptreferent: o. Prof. Dr. Dr.-Ing. Jivka Ovtcharova

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner  
o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers



## **Vorwort der Herausgeberin**

Konfrontiert mit dem steigenden Wettbewerbsdruck auf dem Weltmarkt können Industrieunternehmen heutzutage in globalen Märkten nur durch Innovationen bestehen. Entscheidend sind schnelle, zielgerichtete Entwicklungsprozesse, die zu technisch und wirtschaftlich überlegenen Produkten führen. Vor diesem Hintergrund hat die Produktplanung, in deren Rahmen die wesentlichen Eigenschaften zukünftiger Produkte festgelegt werden, für erfolgreiche Innovation eine herausragende Bedeutung. Zur nachhaltigen Sicherung des Unternehmenserfolges sind Produktentwicklungsprozesse erforderlich, welche sowohl die Bedürfnisse des Marktes als auch die strategischen Ziele des Unternehmens berücksichtigen.

Der Markt, besonders in der Automobilbranche, zeigt den Trend der steigenden Produkt- und Prozesskomplexität und dies in immer kürzeren Zeitabständen. Dem gegenüber stehen die klassischen Entwicklungsprozesse, gekennzeichnet durch gewachsene Strukturen des Informationsmanagements speziell durch heterogene Daten- und IT-Landschaften. Im Raum steht die Forderung nach agileren Prozessen zur Minderung des Verwaltungsaufwands, die Verbesserung der Kommunikation und letztendlich die Reduzierung der Kosten. Es gilt nach neuen Methoden und Konzepten für die Produktentwicklung zu suchen, um dem steigenden Wettbewerbsdruck standhalten zu können.

Eine hinreichend gute Produktdefinition reduziert bekanntlich die Änderungskosten an Prototyp- und Serienwerkzeuge und letztendlich auch die Gewährleistungskosten. Qualitativ hochwertige Produkte erfordern eine ausreichende Produktabsicherung bei gleichzeitig vertretbarem Aufwand und limitierten Ressourcen. Die Verknüpfung der Produkthanforderungen mit der Verifikation und Validation des Produktes in hochgradig dynamischen Entwicklungsprozessen, bei denen sowohl die OEMs als auch die Zulieferer integriert sind, stellt eine neue Herausforderung an ein modernes Anforderungsmanagement dar.

Das klassische Anforderungsmanagement, das sich im Wesentlichen auf die Produktdefinition und die Kontrolle zur Einhaltung der Anforderungen beschränkt, ist nicht mehr ausreichend. Es ist vielmehr eine durchgängige, konsistente Produktbeschreibung notwendig. Weder derzeit bestehende Anforderungsmanagement Systeme noch PDM-Systeme tragen diesen Forderungen Rechnung, da sie isoliert voneinander existieren.

Die vorliegende Arbeit beschreibt das Konzept eines künftigen Anforderungsmanagements, das über die Produktdefinition hinaus die Produktentwicklung ganzheitlich unterstützt. Der Grundgedanke basiert auf natürlichen Entstehungsprozessen von Lebewesen. Mit dem enthaltenen Modell ist das nächste Innovationsziel eines virtuellen Produktes im Automobilbau in greifbare Nähe gerückt.

Jivka Ovtcharova



## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand am Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH) im Rahmen einer externen Doktorandenstelle. Schon lange interessierten mich Evolutions- und Wachstumsprozesse in der Natur und die Frage, ob sie mit Entwicklungsprozessen in der Industrie vergleichbar sind. Als vorteilhaft zur Entstehung dieser Arbeit erwies sich meine langjährige Erfahrung in der strategischen Prozessplanung sowie im Anforderungsmanagement der Adam Opel GmbH.

An dieser Stelle danke ich all denjenigen, die mich bei der Entstehung dieser Dissertation unterstützt haben, allen voran Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Jivka Ovtcharova. Sie hat mir die Gelegenheit zur Promotion gegeben, mich in vielen Gesprächen beraten und mich in meinen Ideen bekräftigt. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner für die Übernahme des Korreferates. Seine konstruktive Kritik als PDM-Experte trug zur Entschärfung einiger kritischer Punkte in meinem Modell bei. Auch möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für das Interesse an meiner Dissertation danken und Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Dank auch allen Mitarbeitern des Instituts für Informationsmanagement im Ingenieurwesen für das Interesse an meinen Vorträgen und die angenehmen Erinnerungen an die Zeit während der Seminare.

Ein Danke auch an Herrn Dipl.-Ing. Matthias Müller, der im Rahmen seiner Diplomarbeit das Visualisierungsproblem entschärft hat.

Aus meinem beruflichen Umfeld danke ich Herrn Dr.-Ing. Axel Lünenbürger (Adam Opel GmbH) für die Unterstützung bei der Vorbereitung auf Vorträge und die fachlichen Diskussionen auf dem Gebiet des Requirements Engineering und Herrn Dr. Jeffrey Abell (GM) für die Korrektur meiner englischsprachigen Dokumente.

Zu Guter Letzt danke ich herzlichst meiner Frau Martina für ihre Geduld und Unterstützung in guten und in schwierigen Zeiten.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Liste der Definitionen .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Aufgabenstellung .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Stand der Technik .....</b>	<b>14</b>
2.1.1 Anforderungen .....	14
2.1.2 Anforderungsmanagement .....	16
2.1.3 Informationstechnologie .....	17
2.1.4 Motivation .....	18
<b>2.2 Problemstellung .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3 Wissenschaftliche Ansätze .....</b>	<b>20</b>
2.3.1 Ahrens .....	20
2.3.2 Quality Function Deployment .....	22
2.3.3 Jörg .....	24
2.3.4 Weber .....	25
2.3.5 Jorgensen .....	26
2.3.6 Gebauer .....	27
2.3.7 Krusche .....	29
2.3.8 STEP .....	30
<b>2.4 Zielsetzung .....</b>	<b>33</b>
<b>2.5 Abgrenzung .....</b>	<b>34</b>
<b>3 Konzept .....</b>	<b>37</b>

---

<b>3.1 Begriffsdefinition und Syntax .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2 Exkurs Natur .....</b>	<b>54</b>
3.2.1 Einleitung .....	54
3.2.2 Bestandteile und Prozesse in der Natur .....	55
3.2.3 Biologie und Produktentwicklung .....	63
3.2.4 Zusammenfassung .....	66
<b>3.3 Anforderungsmodell .....</b>	<b>69</b>
3.3.1 Einleitung .....	69
3.3.2 Produktevolution (ideal) .....	70
3.3.3 Produktwachstum (ideal) .....	90
3.3.4 Überlagerung Produktevolution und Produktwachstum (real) ..	97
3.3.5 Zusammenfassung .....	100
<b>3.4 Zusammenfassung .....</b>	<b>102</b>
<b>4 Methodik .....</b>	<b>105</b>
<b>4.1 Einleitung .....</b>	<b>105</b>
<b>4.2 Initiale Produkt-DNA .....</b>	<b>105</b>
4.2.1 Erfassung von Anforderungen .....	106
4.2.2 Aufbereitung von Anforderungen .....	108
4.2.3 Erstellung der Initialen Produkt-DNA .....	119
<b>4.3 Elementfunktionen .....</b>	<b>130</b>
<b>4.4 Realisierung (theoretisch) .....</b>	<b>132</b>
4.4.1 Implementierung .....	132
4.4.2 Anwenderschnittstelle .....	139
<b>4.5 Zusammenfassung .....</b>	<b>143</b>
<b>5 Verifikation .....</b>	<b>145</b>
<b>5.1 Anforderungen ohne genaue Nennung des Produktelements .....</b>	<b>145</b>
<b>5.2 Aufzählungen .....</b>	<b>148</b>

---

5.3	Eigenschaften oder Merkmale außerhalb der P-DNA .....	149
5.4	Anbau- oder Zubehörteile .....	150
5.5	Modellierung in Abhängigkeit vom Verifikationsergebnis .....	151
5.6	Umgebung .....	151
6	Ergebnisse und offene Punkte .....	153
6.1	Ergebnisse .....	153
6.2	Offene Punkte .....	159
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	161
8	Literaturverzeichnis .....	167
9	Anhang .....	173
9.1	Symbolik der Anforderungselemente .....	174
9.2	Verbformen und gleichbedeutende Ausdrücke .....	176
9.3	Mutation – biologische Definition .....	178



## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Englisch</b>	<b>Deutsch / Erläuterung</b>
ABS	Antiblock System	Antiblockiersystem
AIC	Application Interpreted Construct	
C	Constraint	Randbedingung
CAD	Computer-Aided Design	Rechnerunterstütztes Entwickeln/Konstruieren
CAE	Computer-Aided Engineering	Rechnerunterstütztes Engineering (Berechnung und Simulation)
CAS	Computer Aided Styling , Computer Aided Simulation	Rechnerunterstütztes Design, Rechnerunterstützte Simulation
CAx	Computer Aided everything	Rechnerunterstütztes ...
CL	Cross Link	
CPM	Characteristics-Properties Modelling	
D	Derivation	Ableitung
DMU	Digital Mock-up	
DNA/DNS	deoxyribonucleic acid	Desoxyribonukleinsäure
DP	Dependency	Abhängigkeit
EF	Element Function	Elementfunktion
EPS	Electric Power Steering	Elektr. Servolenkung
ER		Endoplasmatische Retikulum
EXPRESS		Datenmodellierungssprache
F	Feature	Merkmal
GermaNet		Wortnetz für die deutsche Sprache
GIMC	Generic Information Model Component	
HIS		Herstellerinitative Software

<b>Abkürzung</b>	<b>Englisch</b>	<b>Deutsch / Erläuterung</b>
I	Importance	Gewichtung
IE	Information Element	Informationselement
ISO	International Standards Organisation	
IT	Information Technology	Informationstechnologie
iViP		Integrierte virtuelle Produktentwicklung
L, L <sub>P</sub> , L <sub>F</sub> , L <sub>PF</sub>	skeletonized Interface Requirement. P: with Property F: with Feature PF: with either Property or Feature	skelettierte Schnittstellenanforderung P: mit Eigenschaft F: mit Merkmal PF: mit entweder Eigenschaft oder Merkmal
L, L <sub>nP</sub> , L <sub>nF</sub>	normalized Interface Requirement. Index: P: with Property F: with Feature	normalisierte Schnittstellenanforderung P: mit Eigenschaft F: mit Merkmal
mRNA	Messenger Ribonucleic Acid	
NCAP	New Car Assessment Program	
nPE	non-Product Element	Nicht-Produktelement
OEM	Original Equipment Manufacturer	
P	Property	Eigenschaft
PDD	Property-Driven Development/Design	
P-DNA	Product DNA	Produkt-DNA
PDM	Product Data Management	Produktdatenmanagement
pe	subordinate Product Element	untergeordnetes Produktelement
PE	Product Element	Produktelement
PF, P/F	Property Feature	
PKW		Personenkraftwagen
PLM	Product Lifecycle Management	

<b>Abkürzung</b>	<b>Englisch</b>	<b>Deutsch / Erläuterung</b>
PQMS	Product Quality Management System	
QFD	Quality Function Deployment	
R	Requirement	Produktanforderung
R, R <sub>P</sub> , R <sub>F</sub> , R <sub>pe</sub> , R <sub>RD</sub> , R <sub>PF</sub>	skeletonized Product Requirement. Index: P: with Property F: with Feature pe: with Solution RD: with Requirements Document PF: with either a Property or a Feature	skelettierte Produktanforderung. Index: P: Eigenschaftsproduktanforderung F: Merkmalsproduktanforderung pe: Lösungsanforderung RD: mit Anforderungsdokument PF: entweder Eigenschafts- oder Merkmalsanforderung
RD	Requirements Document	Anforderungsspezifikation
ReMaS	Requirements Management Systems	
RIF	Requirements Interchange Format	
RM	Requirements Management	Anforderungsmanagement
R <sub>n</sub> , R <sub>nP</sub> , R <sub>nF</sub> , R <sub>npe</sub> , R <sub>nRD</sub>	normalized Product Requirement. Index: nP: with Property nF: with Feature npe: with Solution nRD: with Requirements Document	normalisierte Produktanforderung. Index: nP: Eigenschaftsproduktanforderung nF: Merkmalsproduktanforderung npe: Lösungsanforderung nRD: mit Anforderungsdokument
RNA	Ribonucleic Acid	
S	Specification	Spezifikation
SDAI	Standard Data Access Interface	

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Englisch</b>	<b>Deutsch / Erläuterung</b>
SOP	Start of Production	Startzeitpunkt für die Serienproduktion
STEP	STandard for the Exchange of Product model data	
TP	Test Procedure	Prüfvorschrift
UML	Unified Modelling Language	
VL	Variant Link	Varianten Verknüpfung
VPI	Vehicle Program Initiation	Offizieller Projektstart
VR	Virtual Reality	
XML	Extensible Markup Language	

## Liste der Definitionen

<b>Nr</b>	<b>Definition</b>	<b>Seite</b>
1	Produkt	37
2	Produktentwicklung	38
3	Eigenschaft	39
4	Merkmal	39
5	Produktelement	39
6	Funktion	40
7	Anforderung	41
8	Produktanforderung	41
9	Qualitative Produkthanforderungen	42
10	Quantitative Produkthanforderungen	42
11	Normalisierung	45
12	Normalisierte Produkthanforderung	45
13	Normalisierte, lösungsgebundene Produkthanforderung	46
14	Normalisierte, referenzierende Merkmalsanforderung	47
15	Produkthanforderung in allgemeiner Form	51
16	Randbedingung	52
17	Produktevolution	70
18	Produkt-DNA	71
19	Transformation	73
20	Distribution	74
21	Ableitung	74

---

<b>Nr</b>	<b>Definition</b>	<b>Seite</b>
22	Normalisierte Schnittstellenanforderung	84
23	Cross Link	85
24	Abhängigkeit	87
25	Produktwachstum	91
26	Elementfunktion	99
27	Produktorganismus	99
28	Skelettierung	109
29	Nicht-Produktelement	110
30	Variantenverknüpfung	127

## Die drei Steinmetze (erster Teil)

Es waren einmal drei Steinmetze, die arbeiteten an der Großbaustelle des Kölner Doms. Ein Märchenerzähler fragte den Ersten: „Was tust Du da?“ „Das siehst Du doch. Ich behaue Steine, die beiden muss ich noch, dann habe ich endlich Feierabend.“ Der Märchenerzähler ging weiter und fragte den zweiten. Dieser antwortete: „Das siehst Du doch. Ich mache eine Statue. Ist'ne verdammt harte Arbeit, wird aber gut bezahlt. Schließlich habe ich eine Frau und vier Kinder. Die wollen was zu essen haben.“ Der dritte Steinmetz legte kurz seinen Hammer nieder und schaute auf die Frage nach oben: „Das siehst Du doch. Ich baue eine Kathedrale.“<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Quelle: Jürgen Fuchs, Das Märchenbuch für Manager, Gute-Nacht-Geschichten für Leitende und Leidende, F.A.Z. - Buch, 2000, ISBN 3-933180-42-2



# 1 Einleitung

Unternehmen der produzierenden Wirtschaftszweige unterliegen heute einem permanenten Wandel, da sie sich ständig verschärfenden Wettbewerbsbedingungen anpassen müssen. Unternehmenszusammenschlüsse sind charakteristisch für die heutige Zeit, wobei die Automobilindustrie sicherlich eine führende Rolle einnimmt. Riesige Konzerne mit oft über hunderttausend Mitarbeitern agieren über die Kontinente hinweg. Globalisierung und Outsourcing sind die zentralen Unternehmensstrategien, um am Weltmarkt wettbewerbsfähig bleiben zu können. Erfolg haben nur Unternehmen, die qualitativ hochwertige Produkte zu attraktiven Preisen zum richtigen Zeitpunkt im entsprechenden Markt platzieren.

Treiber dieses Wettbewerbs ist letztendlich der Kunde. Seine Wünsche bestimmen die Anforderungen und Trends. Produktindividualisierung im Automobilbau sowohl im Aussehen als auch in der Funktionalität führt zu raschen Modellwechseln und einer zunehmenden Ausstattungsvielfalt.

Neben dem Kunden beeinflussen auch die Gesetzgeber die Produkte maßgeblich. Sicherheit, sowohl für die Fahrzeuginsassen, Fußgänger als auch andere Verkehrsteilnehmer, ist noch immer ein zentrales Thema. Eine ebenso wichtige Rolle spielt in der heutigen Zeit von globaler Klimaerwärmung und schwindenden Rohstoffen die Umweltverträglichkeit. Auch hier wirken die Gesetzgeber auf die Hersteller ein.

Steigende Anforderungen an das Produkt führen zu immer weiter optimierten technischen Lösungen. Eine bedeutende Rolle fällt hierbei der Mechatronik zu. Die Grenzen zwischen den klassischen Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik verschwimmen, und es entstehen zunehmend komplexere Produkte.

Auch die Produktentwicklungsprozesse sind einem ständigen Wandel unterworfen. Die Gesamtentwicklungszeiten werden zunehmend kürzer, daher müssen viele Teilprozesse gleichzeitig ablaufen. Simultaneous Engineering bzw. Concurrent Engineering sind Methoden in modernen Entwicklungsprozessen, die heutzutage zum Tragen kommen.

Anforderungsmanagement ist eine anerkannte und etablierte Disziplin in der Automobilindustrie. Allerdings besitzen die heutigen Methoden im Anforderungsmanagement im oben beschriebenen Umfeld viel Verbesserungspotential. Während das Anforderungsmanagement in der Softwareentwicklung sowie der Elektrik/Elektronik ständig verbessert wird, besteht in der Automobilindustrie

massiver Nachholbedarf. Eine Ursache liegt vermutlich im Produkt an sich, welches auf Grund der Vielzahl von Wirkprinzipien nur sehr schwer zu beschreiben ist. Eine weitere Ursache besteht im Ungleichgewicht zwischen Maschinenbau und Informationstechnik. Im Automobilbau nimmt der Maschinenbau noch immer die dominierende Rolle ein. Während sich das Gleichgewicht zwischen Maschinenbau und Informatik mit dem Voranschreiten der Mechatronik in absehbarer Zeit von selbst einstellen wird, bleibt die Herausforderung der Beschreibung des Produktes weiterhin bestehen.

Der Titel der vorliegenden Arbeit lautet: „Integratives Anforderungsmanagement“. Der Fokus liegt hierbei auf dem Begriff *Anforderungsmanagement*, der sowohl die Prozesse der Erstellung von Produkthanforderungen als auch deren Beurteilung und Verfolgung zum Ziel hat. Vorgestellt wird ein Anforderungsmodell<sup>2</sup>, das beschreibt, in welcher Form Produkthanforderungen vorliegen sollen und miteinander in Verbindung stehen, als auch ein Konzept zur Umsetzung dieses Modells. Das Anforderungsmanagement ist *integrativ*. Es soll nicht als „integrierter“ Bestandteil des Entwicklungsprozesses verstanden werden, sondern selbst die Integration von Prozess- und Produktbestandteilen fördern. Da das Modell im Rahmen dieser Arbeit auf Grund des Umfangs nur eingeschränkt verifizierbar ist, handelt es sich um ein Konzept. Als Anwendungsgebiet wurde die Automobilindustrie gewählt, da einerseits schon die Vielzahl der Anforderungen an die Entwicklung des Produktes eine Herausforderung ist, und andererseits die einmal nach dieser Methodik erstellten Anforderungen einen hochgradigen Wiederverwendungswert besitzen. Die Wiederverwendung der Anforderungen kommt dem Entwicklungsprozess entgegen, da es sich bei den heutigen Serienfahrzeugen im Wesentlichen um Anpassungskonstruktionen handelt.

Die Dissertation ist wie folgt aufgebaut (Abbildung 1 und 2):

In Kapitel 2 wird die Aufgabenstellung definiert. Dazu gilt es zuerst den Stand der Technik in der Automobilindustrie näher zu beleuchten (Kapitel 2.1). Von besonderer Bedeutung sind hier der Fahrzeugentwicklungsprozess, die Informationen über das Produkt und die Technologien. Danach wird in Kapitel 2.2 auf die derzeitige Problematik im Anforderungsmanagement genauer eingegangen. Um später einen Lösungsvorschlag ausarbeiten zu können, werden in Kapitel 2.3 existierende Ansätze der letzten Jahre aufgezeigt. Aus der Problemstellung und den existierenden Ansätzen werden anschließend in Kapitel 2.4 die Ziele dieser Arbeit definiert und in Kapitel 2.5 die Grenzen abgesteckt.

In Kapitel 3 wird ein Konzept für den Aufbau von Anforderungen und deren Beziehungen beschrieben. Dazu werden im Unterkapitel 3.1 die notwendigen Begriffe angepasst bzw. definiert. In Kapitel 3.2 machen wir einen Exkurs in die Biologie.

---

<sup>2</sup> Nachfolgend auch als Modell bezeichnet

---

Darin werden natürliche Prozesse wie Evolution und Wachstum sowie der Träger der Erbanlagen betrachtet. Dieser Exkurs soll dazu beitragen, die Produktentstehung aus einer anderen, genauer, aus einer natürlichen Perspektive zu beleuchten.

Das Anforderungsmodell aus Kapitel 3.3 bildet die Grundlage für die Methodik zum Aufbau einer Art Anforderungsnetzwerk, der sogenannten *Produkt-DNA* (Kapitel 4.2). Zur Unterstützung des Menschen bei administrativen Tätigkeiten wird die Produkt-DNA um sogenannte Elementfunktionen in Kapitel 4.3 erweitert.

In Kapitel 5 wird das Modell verifiziert. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der Umsetzung von umgangssprachlich erfassten Anforderungen in die entwickelte Struktur für Produkt- und Schnittstellenanforderungen.

Kapitel 6 beinhaltet die bis dahin gewonnenen Ergebnisse und noch offenen Punkte. Eine Zusammenfassung der Arbeit sowie einen Ausblick findet man abschließend in Kapitel 7.

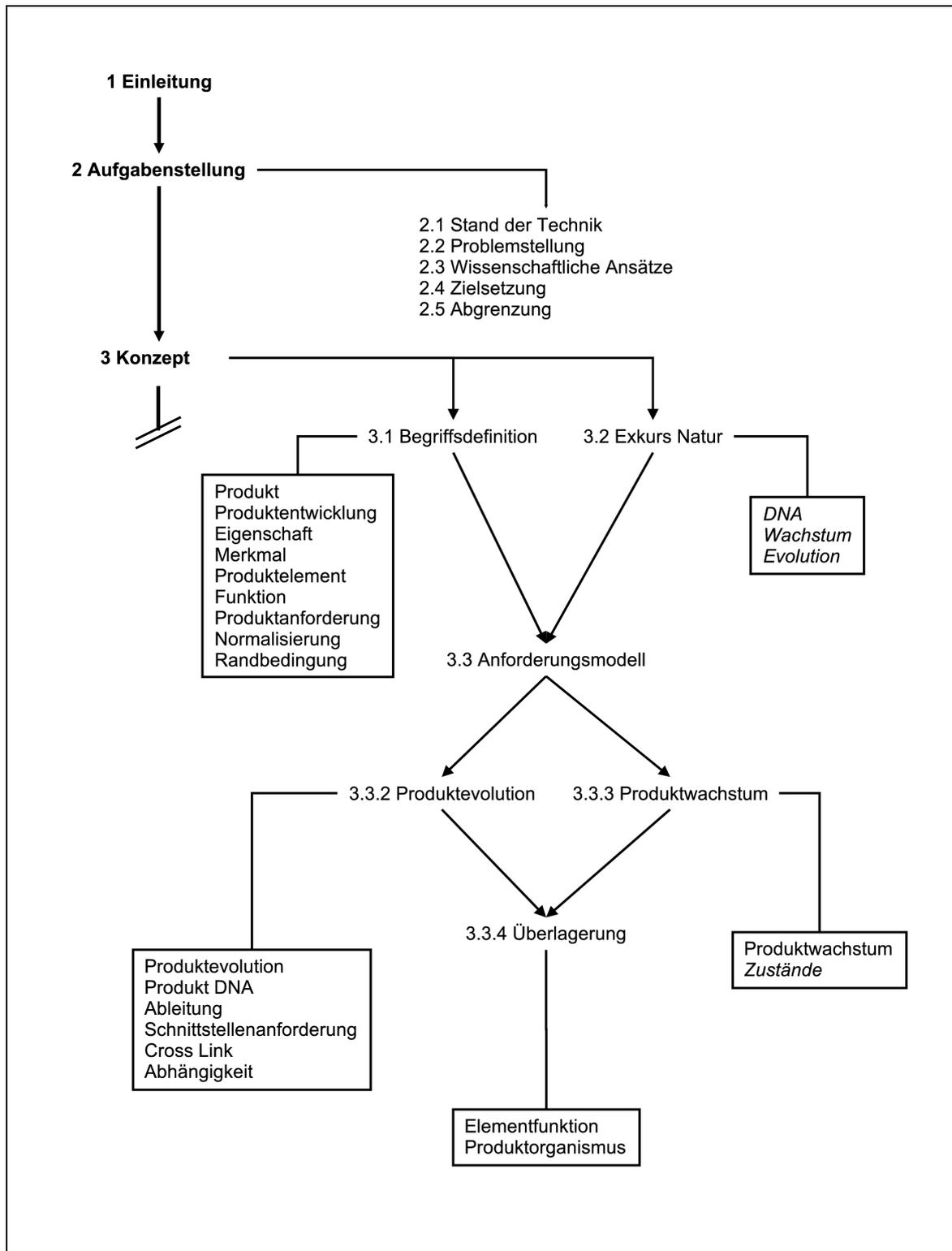


Abbildung 1: Thematischer Aufbau der Arbeit (1)

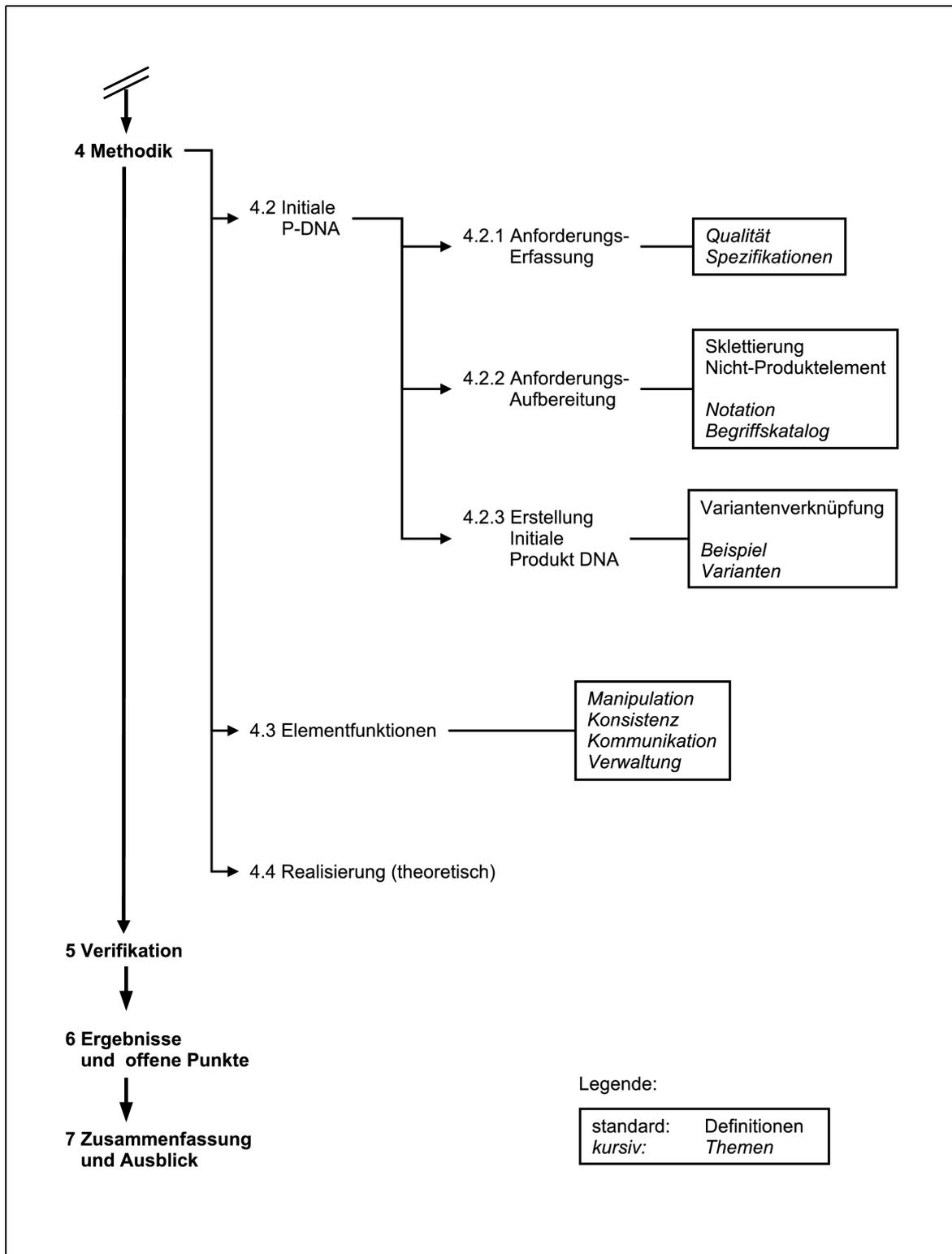


Abbildung 2: Thematischer Aufbau der Arbeit (2)



## 2 Aufgabenstellung

Die Ausarbeitung der Aufgabenstellung erfolgt in fünf Schritten. Zuerst wird der Stand der Technik der Produktentwicklung in der Automobilindustrie im Allgemeinen und hinsichtlich des Anforderungsmanagements im Speziellen näher beleuchtet. Aus den vorhandenen Defiziten wird anschließend beschrieben, welche Probleme im Anforderungsmanagement existieren. Zu diesem Thema werden mehrere existierende wissenschaftliche Ansätze untersucht. Auf ihrer Grundlage und der Problemstellung werden das Ziel dieser Arbeit definiert und der Rahmen abgesteckt.

Um das Anforderungsmanagement in der heutigen Automobilentwicklung, speziell bei Personenkraftwagen, verstehen zu können, werden zuerst die Produktentwicklung und deren Charakteristika grob erläutert. Hierzu werden zuerst der Fahrzeugentwicklungsprozess und einige seiner Teilprozesse sowie das Produkt und die notwendige Organisation betrachtet und danach in ähnlicher Weise der Anteil des Fahrzeugentwicklungsprozesses, welcher das Anforderungsmanagement einschließt.

Heutzutage wird vom Produktlebenszyklus gesprochen. Damit ist der Zeitraum von der ersten Planungsaktivität für ein Fahrzeug bis hin zum Recycling gemeint (Abbildung 3). Er umfasst unter anderem die Produktplanung mit der Produktauslegung und Konzeptfindung, gefolgt von der Konstruktion mit den virtuellen und physischen Prototypen und der Erprobungsphase zur Produktvalidierung. Es schließt sich die Serienfertigung gefolgt von der Nutzung des Produktes durch den Kunden sowie die Verschrottung bzw. die Wiederverwertung an.

Für das Projektmanagement ist der Zeitraum zwischen dem offiziellen Projektstart (VPI)<sup>3</sup> und dem Start der Serienproduktion (SOP)<sup>4</sup> von Wichtigkeit (derzeit 36 Monate und weniger). Die Erfahrung zeigt jedoch, dass vom Aufwand nicht unerhebliche Aktivitäten schon vor dem offiziellen Projektstart ablaufen. Je nachdem, ab wann man von ersten vorbereitenden projektbezogenen Aktivitäten spricht, liegt der Startzeitpunkt (Point-Zero) heutzutage zwischen 6 Monaten und 5 Jahren vor dem offiziellen Projektstart. Bezogen auf ein Fahrzeugprojekt betrifft dies die strategische Produktplanung inklusive der Voraentwicklung. Bei realistischer Betrachtungsweise erstreckt sich die Produktentwicklung über den Zeitraum vom Point-Zero bis zum Start der Serienproduktion.

---

<sup>3</sup> nach General Motors VPI: Vehicle Program Initiation

<sup>4</sup> SOP: Start of Production

Ein Instrument des Projektmanagements ist nach wie vor die Netzplantechnik. GANTT-Diagramme<sup>5</sup> sind ein Diagrammtyp aus der Netzplantechnik. Sie dienen der zeitlichen Darstellung von (Teil-) Prozessen. Eine sehr vereinfachte Variante eines GANTT-Diagramms zeigt schematisch die Unterteilung der Produktentwicklung in drei Teilprozesse: die Planung, die Konstruktion und die Erprobung des Produktes.

Charakteristisch für heutige Fahrzeugentwicklungsprozesse ist die hochgradige Parallelität der Teilprozesse. Wie in Abbildung 3 dargestellt, werden schon erste Konstruktionen und Erprobungen an Systemen und Komponenten durchgeführt, obwohl die vollständige Produktplanung noch nicht abgeschlossen ist.

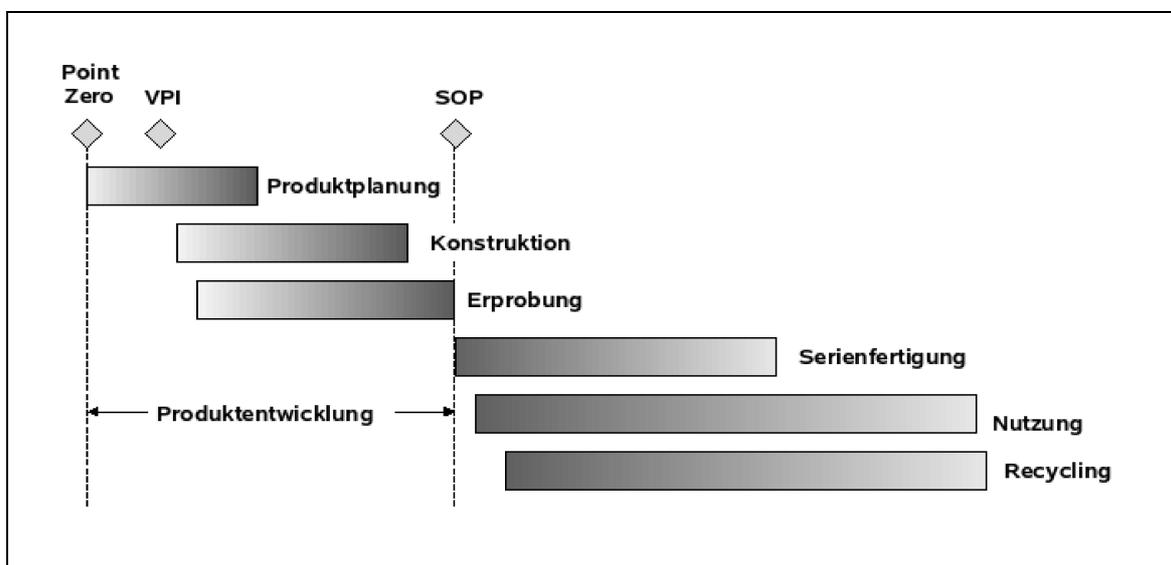


Abbildung 3: Produktlebenszyklus

Heutige Personenkraftwagen sind im Sinne der Fahrzeugentwicklung äußerst komplexe Produkte. Diese Komplexität ergibt sich im Wesentlichen aus folgenden vier Punkten:

### Anzahl der Systeme, Komponenten und Teile

Unterteilt man ein Fahrzeug grob in Systeme, Komponenten und Teile, wobei die Grenzen nicht scharf definiert werden können, so besteht ein PKW aus ca. 50 Systemen, ca. 300 Komponenten und bis zu 18.000 Teilen. Die Komplexität liegt hier im Management der relativ hohen Zahl von Bestandteilen.

<sup>5</sup> GANTT-Diagramme sind Instrumente des Projektmanagements zur Visualisierung der zeitlichen Abfolge von Aktivitäten.

## **Funktionen**

Es ist zu beobachten, dass auf Grund neuer Technologien der Funktionsumfang in den Fahrzeugen weiter zunimmt. Quantitative Aussagen über den Funktionsumfang lassen sich nur schwer treffen, da zum einen der Begriff der Funktion nicht hinreichend definiert werden kann und zum anderen stark von der Fahrzeugklasse und der Fahrzeugkonfiguration abhängt. Realisierung von Funktionen auf Grund neuer Technologien sind zum Beispiel: Head-Up-Display (für den Fahrer in die Frontscheibe eingespiegelte Informationen), LED-Frontscheinwerfer aus Leuchtdioden, hybride Antriebssysteme (Kombination aus Verbrennungs- und Elektroantrieb) oder Direct-Driven-Wipers (direkt angetriebene Wischersysteme).

## **Varianten, Konfigurationen**

Die Entwicklung eines neuen Fahrzeugs geschieht meistens innerhalb eines Fahrzeugprogramms<sup>6</sup>, das heißt, mehrere Karosserievarianten werden mehr oder weniger gleichzeitig entwickelt. Daneben entstehen während der Entwicklung verschiedene Fahrzeugauslegungen auf Grund diverser Konfigurationen (zum Beispiel: Klimaanlage nur in Kombination mit einem bestimmten Motor). Diese Variantenvielfalt erhöht die Komplexität.

## **Beziehungen**

Zwischen den einzelnen Systemen, Komponenten und Teilen existieren Beziehungen der unterschiedlichsten Art, die bei der Entwicklung beachtet werden müssen. So zum Beispiel Beziehungen von Systemanforderungen zu Fahrzeuganforderungen oder auch Beziehungen, meist physikalischer Art, zwischen den Systemen. Die Komplexität liegt hier in der hohen Zahl der Beziehungen zwischen den Fahrzeugbestandteilen.

Ein weiteres Charakteristikum des Produktes Fahrzeug ist, dass es sehr selten im Rahmen einer kompletten Neuentwicklung entsteht. Vielmehr sind PKWs, die in Großserien gefertigt werden, meist Anpassungskonstruktionen. Üblicherweise werden dazu die Daten des Vorgängermodells als Grundlage für die Entwicklung herangezogen und für das neue Modell angepasst. Im Übrigen ist zu beobachten, dass Fahrzeuge der unteren Klasse sich oftmals an Fahrzeugen der nächst höheren Klasse orientieren (Beispiel Volkswagen: Polo und Golf, Beispiel Opel: Corsa und Astra).

---

<sup>6</sup> Ein Fahrzeugprogramm beinhaltet meist mehrere Fahrzeugprojekte.

Die dazugehörige Organisationsstruktur folgt einer Ausprägung der Matrixorganisation<sup>7</sup>, zumindest bei europäischen Automobilherstellern. Dargestellt wird diese Organisationsform in einer Matrix, wobei die Projektorganisation gegen die Funktionsorganisation aufgetragen wird. Die Zeilen der Matrix bilden hierbei die Fahrzeugprojekte (zum Beispiel: Corsa, Astra, Vectra), die Spalten der Matrix die Funktionsbereiche (zum Beispiel: Einkauf, Planung, Konstruktion). Die Projektorganisation richtet sich meist nach dem Plattformkonzept. Dieses Konzept sieht vor, dass Fahrzeuge, die zu einer Klasse gehören (Unterklasse, Mittelklasse, Oberklasse und Premiumklasse), jeweils in einer Plattform zusammengefasst werden, um Synergieeffekte bei der Entwicklung zu nutzen. Eine Plattform ist somit für mehrere Fahrzeugprojekte einer Klasse verantwortlich.

Ein weiteres Charakteristikum heutiger Fahrzeugentwicklungsprozesse ist die sogenannte Fahrzeugarchitektur. Innerhalb eines Fahrzeugprojektes werden meist mehrere Karosserievarianten entwickelt, teilweise auch in Hinblick auf verschiedene Märkte. Um den Gleichteilanteil zu optimieren, wird zu diesem Zweck eine sogenannte Fahrzeugarchitektur definiert. Dies ist, vereinfacht gesprochen, der Anteil an Funktionen und geometrischen Rahmenbedingungen, der allen Fahrzeugen innerhalb des Fahrzeugprojektes gemeinsam ist.

Die im Entwicklungsprozess anfallenden Daten werden in Computern verwaltet. In der frühen Phase der Produktentwicklung dominieren Office-Werkzeuge. Erst mit fortschreitender Produktreife werden professionelle, datenbankgestützte IT-Werkzeuge eingesetzt. Dazu gehören CAx Systeme wie zum Beispiel Computer Aided Design (CAD) in der Konstruktion oder Computer Aided Engineering (CAE) in der technischen Berechnung sowie Product Data Management Systeme (PDM) im Prototypenbau und der Fertigung, um nur einige zu nennen.

Nach dieser allgemeinen Betrachtung des Fahrzeugentwicklungsprozesses soll nun etwas genauer auf dessen anforderungsrelevanten Teil eingegangen werden.

Der Anforderungsmanagementprozess erstreckt sich über die gesamte Produktentwicklung. Für die Erstellung der Produkthanforderungen werden etwa 18 Monate plus die Zeit vor dem offiziellen Programmstart benötigt.

Ein Teil des Requirements Managements ist das Requirements Engineering. Das Requirements Engineering ist der Anteil, der sich mit der Produktdefinition beschäftigt. Zeitlich betrachtet beginnt Requirements Engineering noch vor dem offiziellen Projektbeginn (VPI<sup>8</sup>). Da es keine Bezeichnung für diesen Zeitpunkt des Requirements Engineering im Sinne dieser Arbeit gibt, soll dieser *Point-Zero* genannt werden (siehe Abbildung 3, Seite 8). Er ergibt sich automatisch bei der Aufnahme eines neuen Fahrzeugprojektes in das Portfolio für künftige Fahrzeugprojekte. Requirements Engineering endet heutzutage etwa in der Mitte eines Fahr-

<sup>7</sup> zu Matrixorganisation siehe auch WOEH-86, Seite 170

<sup>8</sup> VPI steht für "Vehicle Program Initiation" gemäß dem Fahrzeugentwicklungsprozess von General Motors.

zeugprojektes (zwischen VPI und SOP<sup>9</sup>), zu welchem alle Anforderungen an das Produkt und dessen Bestandteile definiert, balanciert und festgeschrieben sind. Von da an unterliegen Anforderungen der Änderungskontrolle. Das Requirements Engineering ist neben der Konzeptfindung, der Integration von Zulieferern, der Planung der Prototypen sowie weiteren Teilprozessen ein Hauptbestandteil der Produktplanung.

Lässt man die späten Änderungsanträge außer Acht, so erstreckt sich Requirements Engineering über die Phase der Produktplanung. Im Gegensatz dazu ist der Zeithorizont des Requirements Management weiter gefasst. Zum Requirements Management gehören zusätzlich die Produktverifikation und -validation. Da während der gesamten Produktentwicklung Prototypen (virtuell und physisch) des Gesamtproduktes, aber auch ganze Produktbestandteile konstruiert, gebaut und getestet werden, erstreckt sich das Requirements Management über die gesamte Produktentwicklung.

Neben der zeitlichen Einordnung der Begriffe Requirements Engineering und Requirements Management gibt es im Zusammenhang mit Anforderungen noch die Sicht auf das Produkt, in der einschlägigen Literatur besser bekannt unter dem Begriff *V-Modell*<sup>10</sup> [Bosc-03, Seite 109]. Das V-Modell steht symbolisch für die Vorgehensweise im Anforderungsmanagement. Für gewöhnlich folgt die Erfassung von Produkthanforderungen einem *Top-down-Ansatz*. Zuerst werden Anforderungen an das Produkt (hier: Fahrzeug) gestellt. Diese werden anschließend sukzessive auf Systemebene aufgegliedert. Diese wiederum werden weiter aufgeteilt auf Komponenten oder Teilebenen.

Mit den so gewonnenen Anforderungen können die Komponenten konstruiert werden. Anschließend findet die Verifizierung statt – entweder mittels Simulation und/oder an physischen Prototypen.

Die Verifizierung und Validierung<sup>11</sup> folgt einem *Bottom-up-Ansatz*. Zuerst werden die Komponenten geprüft und danach zu nächstgrößeren funktionalen Einheiten zusammengebaut. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von *Integration*. Diese nächstgrößeren Einheiten, in diesem Fall die Systeme, werden ihrerseits verifiziert und validiert und anschließend zu einem Fahrzeug zusammengebaut. Im letzten Schritt wird das Fahrzeug als Ganzes verifiziert und validiert.

Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 4 schematisch festgehalten. Der linke Ast des V-Modells verkörpert die Produktdefinition, das heißt die Erfassung der Produkthanforderungen. Der rechte Ast des V-Modells steht für die Produktverifikation und -validation.

---

9 SOP steht für „Start of Production“ und ist ein gängiger Begriff in der Industrie, welcher den Beginn der Serienfertigung kennzeichnet.

10 Ursprünglich stammt das V-Modell aus der Informationstechnologie hat sich jedoch auch im Fahrzeugentwicklungsprozess etabliert.

11 Die Begriffe *Verifizierung* und *Validierung* werden in Kapitel 4.2 noch definiert.

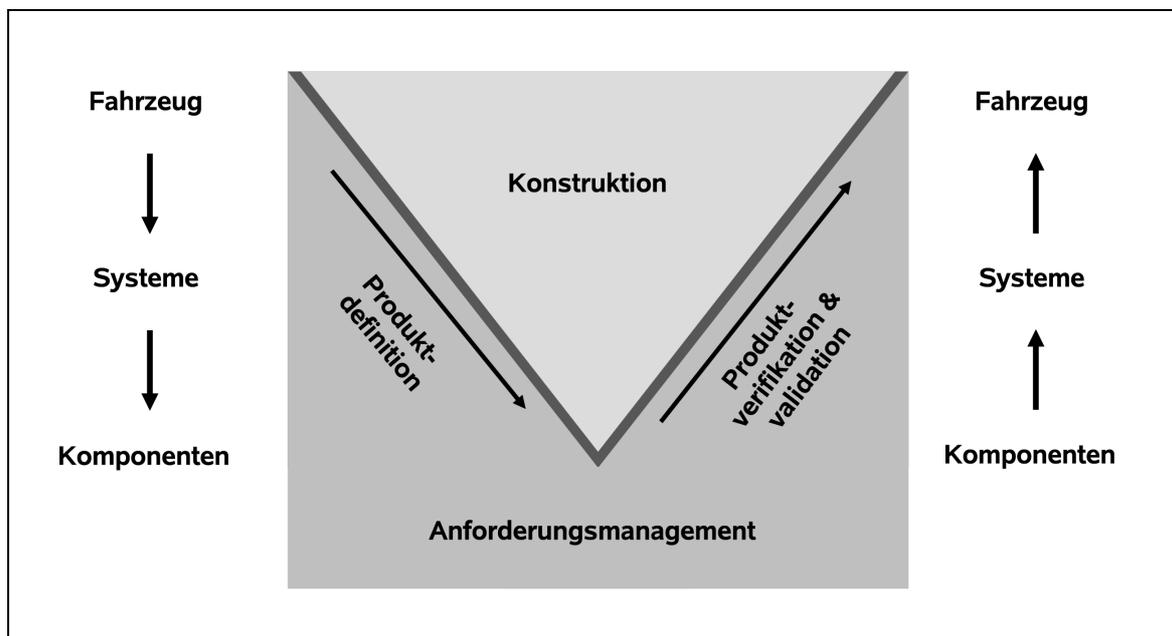


Abbildung 4: V-Modell

Aus organisatorischer Perspektive gilt hervorzuheben, dass in dem Requirements Management Prozess diverse Funktionsbereiche eingebunden sind:

- Der Bereich Marketing, welcher die Kunden-/Marktanforderungen benennt
- Der Bereich Gesamtfahrzeug, welcher Kenntnisse über Vergleichswerte ähnlicher Produkte von Mitbewerbern für die Anforderungserstellung beiträgt
- Die Plattformorganisation, welche unter anderem die Produktverantwortung trägt und die Erfassung, Balancierung und Umsetzung der Anforderungen treibt
- Die Produktentwicklung, welche zur Definition der Anforderungszielwerte beiträgt und für die Umsetzung in technische Lösungen verantwortlich ist
- Der Bereich Finanz, welcher die Kosten (nach Kostenarten) kontrolliert

Die Kunden der Anforderungen sind im Wesentlichen:

- Der Bereich Produktentwicklung, zuständig für die Konstruktion sowie Prüfung und Validierung
- Der Bereich Einkauf als Schnittstelle zu den Zulieferern
- Der Bereich Fertigungsentwicklung, zuständig für Fertigungseinrichtungen und Werkzeuge

Die wichtigsten Aufgaben des Requirements Management sind:

- das Sammeln von Anforderungen aus den verschiedenen Funktionsbereichen
- die Übersetzung von nicht-technischen Anforderungen in technische Anforderungen unter Berücksichtigung existierender technischer Lösungen
- das Balancieren von konkurrierenden Anforderungen über Verhandlungen mit den Funktionsbereichen
- das Prüfen der technischen Lösungen auf Erfüllung der Anforderungen mit Hilfe von physischen und/oder virtuellen Prototypen
- die Validierung der Ergebnisse (einschl. dem Risikomanagement im Falle von Abweichungen der Lösungen gegenüber den Anforderungen)

Komplexe technische Produkte, wie zum Beispiel ein PKW, bestehen aus einer Vielzahl von Bestandteilen. Die Gliederung des Fahrzeugs in seine Bestandteile geschieht in der Regel nach funktionalen Gesichtspunkten. Die Komponenten werden mehr oder weniger isoliert voneinander entwickelt. System- und Komponentenspezifikationen sollen hierbei sicherstellen, dass die einzelnen Bestandteile des Fahrzeugs im Gesamtverbund funktionieren. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass diese Lastenhefte nicht selten über- oder auch unterspezifiziert sind. Insbesondere in Hinblick auf die Anforderungen an die benachbarten oder übergeordneten Systeme.

Die wohl risikoreichste Ursache für die Unterspezifizierung steckt in der Vergabe von Aufträgen<sup>12</sup> für Systeme und Komponenten an Fremdfirmen. Einerseits müssen die Angebotsanfragen für Bestandteile mit langer Entwicklungszeit frühzeitig an die Zulieferer gestellt werden, andererseits wird die Gesamtentwicklungszeit für ein Fahrzeug zunehmend kürzer. Die Folge daraus ist, dass schon Anfragen an die Zulieferer zu einem Zeitpunkt gestellt werden müssen, zu dem das Gesamtprodukt Fahrzeug noch nicht vollständig definiert ist und deshalb Nachbesserungen hinsichtlich der Anforderungen von Seiten des Auftraggebers an den Zulieferer

---

12 Oftmals wird hierfür der englische Begriff „Outsourcing“ verwendet.

notwendig sind. Der Zulieferer lässt sich nicht selten solche späten Forderungen preislich „vergolden“, begründet über Änderungen am Produkt oder auch an den Werkzeugen. Damit entschärft der Zulieferer die risikoreiche Kalkulation seines Angebots, zu der er gezwungen war, da er wusste, dass bei der Auswahl des Zulieferers oftmals ein möglichst günstiger Anbieter gewählt werden wird.

Zwei Ursachen sind für die Überspezifikation zu nennen. Auf Grund der Tatsache, dass die Zulieferer zu einem frühen Zeitpunkt festgelegt werden müssen, kann es wegen der unzureichenden Spezifikation der Systeme und Komponenten auch zu einer Überspezifikation kommen. Um das technische Risiko möglichst gering zu halten, wählt man gerne einen größeren Funktionsumfang oder dimensioniert die Merkmale höher als letztendlich notwendig. Die zweite Ursache liegt in der Vorgehensweise zur Erstellung der Spezifikationen. Oftmals werden Spezifikationen aus Vorgängerprojekten kopiert, aber nicht hinreichend geprüft<sup>13</sup>. Beide Ursachen führen zu Kostensteigerungen.

## 2.1 Stand der Technik

Anforderungsmanagement als anerkannte eigenständige Disziplin in der Automobilindustrie ist verhältnismäßig neu im Vergleich zur Software- und Elektroindustrie, und entsprechend dürftig sind aktuelle Informationen. Entsprechend schwierig ist es, ein Bild über den aktuellen Stand des Anforderungsmanagements, speziell im Automobilbau, aufzuzeigen. Einen verhältnismäßig guten Überblick bietet der Automotive Track der Requirements Engineering Tagung, die einmal jährlich in München stattfindet. Dort vertreten sind allerdings nur OEMs und Zulieferer aus dem deutschsprachigen Raum. Der hier aufgezeigte Stand der Technik basiert im Wesentlichen auf Vorträgen der Automobilhersteller BMW, DaimlerChrysler und der VW-Gruppe (vertreten durch Audi und VW) sowie den Automobilzulieferern Bosch und Hella aus den Jahren 2006 und 2007.

### 2.1.1 Anforderungen

Die Spezifikationen an das Produkt Fahrzeug oder seiner Bestandteile liegen heutzutage noch in zwei Formen vor. Zum einen das klassische Lastenheft in Form von Dokumenten, erstellt mit Standard Office-Werkzeugen (zum Beispiel: MS Word, Excel, Powerpoint), und zum anderen Anforderungen in vereinzelter Form, das heißt in einzelnen Sätzen. Der Trend geht eindeutig weg vom Office-Dokument hin zu vereinzelter Anforderungen. Die Anforderungen werden in strukturierten

---

<sup>13</sup> „copy and paste behaviour“

Tabellen gehalten und umfassen teilweise pro System mehrere tausend Einträge (Beispiel: ca. 4000 für das Informations- und Kommunikationssystem in heutigen BMWs [Smet-06, Seite 14])

Zur Beherrschung des Anforderungsumfangs werden die Anforderungen klassifiziert. Die gängigsten Klassifizierungen sind:

- Ebenen, das heißt nach Architektur-, Domänen- und Komponentenebenen
- Funktionen (zum Beispiel: Antrieb, Abgasreinigung, Federung)
- Projektspezifisch und projektübergreifend

Die Ebenen- und die Funktionsklassen sind als hierarchische Strukturen ausgeprägt.

Vor dem Hintergrund der Wiederverwendung von Wissen werden derzeit Bibliothekskonzepte etabliert. Diese enthalten Fahrzeugfunktionen, Technologievarianten sowie Bauteilanforderungen. Das Ziel hierbei ist, sich der generischen Einträge der Bibliotheken zu bedienen, um in neuen Fahrzeugprojekten das Produkt in der Definitionsphase zu konfigurieren. Die Bibliothek beinhaltet folglich fahrzeugprojektunabhängige, markenübergreifende Anforderungen (Abbildung 5).

Anforderungen werden nach Bedarf über *Referenzen* miteinander vernetzt. Allerdings ist festzustellen, dass zwischen den verschiedenen Arten von Beziehungen nur unzureichend unterschieden wird. So stehen beispielsweise zwei Anforderungen über Referenzen in Beziehung zueinander, jedoch wird nicht unterschieden, ob sich die Anforderungen gegenseitig beeinflussen oder aufeinander aufbauen.

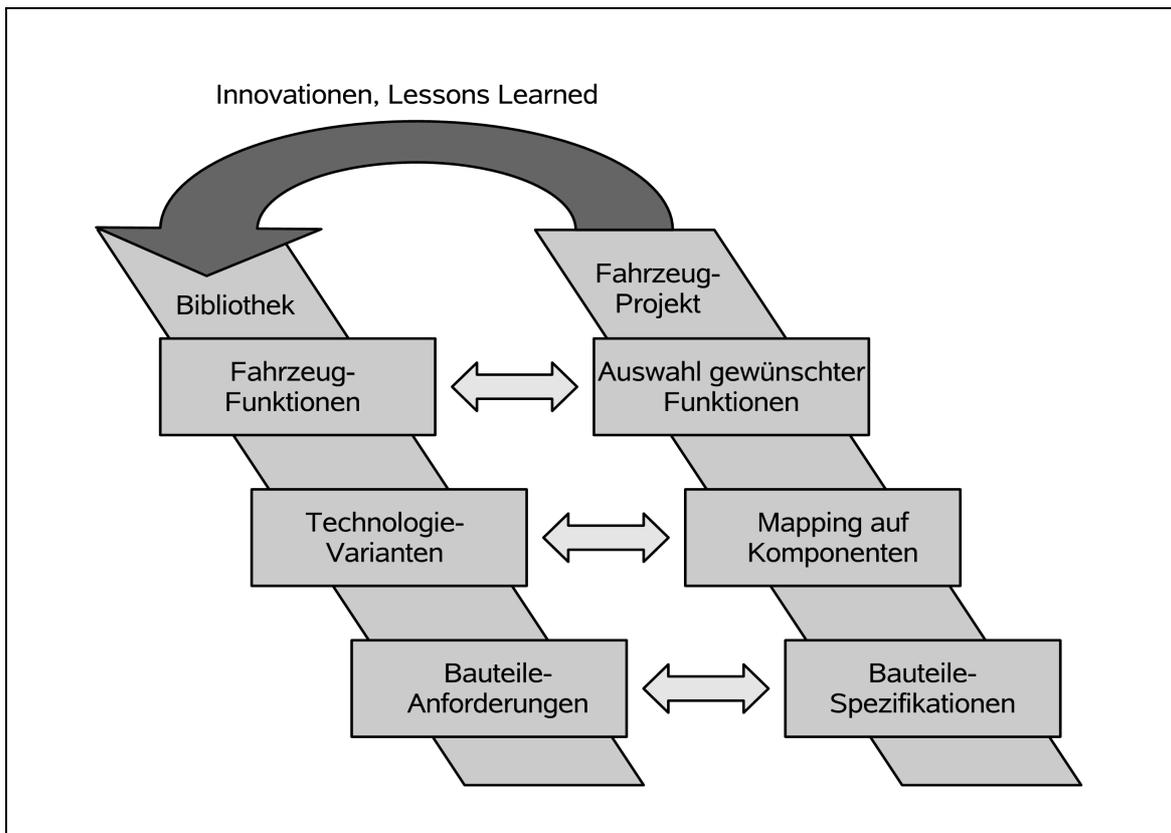


Abbildung 5: Funktionsorientierung und Bibliothekskonzept. Quelle: [WaSz-07], Seite 11]

## 2.1.2 Anforderungsmanagement

Der Schwerpunkt des Anforderungsmanagements liegt eindeutig auf der technischen Definition des Produktes und somit in den Produktentwicklungsbereichen. Es ist nicht zu erkennen, ob und in wie weit nicht-technische Anforderungen wie zum Beispiel Marketing- oder Finanzanforderungen ebenfalls in Anforderungstabellen der heutigen RM-Tools mit erfasst werden. Die Vermutung liegt nahe, dass speziell die Finanzdaten außerhalb der RM-Tools gehalten werden.

Zulieferer sind verstärkt in den RM-Prozess mit eingebunden. Hierzu werden die vereinzelt Anforderungen in tabellarischer Form vom OEM an die Zulieferer gesendet (Bestandteil des Lastenhefts<sup>14</sup>). Diese wiederum beurteilen die Anforderungen (Bestandteil des Pflichtenhefts<sup>15</sup>) und senden diese in der gleichen tabellarischen Form wieder an die OEMs zurück. Vorteil dieser Methode ist, dass

<sup>14</sup> Das Lastenheft beinhaltet alle Anforderungen des Auftraggebers bezüglich des Liefer- und Leistungsumfangs beschrieben im Sinne: „was wofür“ zu lösen ist. Siehe auch [KTA-02, Seite 168]

<sup>15</sup> Das aus dem Lastenheft abgeleitete und von Auftragnehmer erstellte Pflichtenheft enthält eine Beschreibung zur Realisierung der Anforderungen des Lastenhefts im Sinne: „wie und womit“ die Anforderungen zu erfüllen sind. Siehe auch [KTA-02, Seite 171]

jede einzelne Anforderung seitens der Zulieferer beurteilt werden muss. Der OEM ist somit in der Lage aussagekräftigere Risikoabschätzungen vorzunehmen als im Falle des klassischen Lasten- und Pflichtenheftaustauschs in Dokumentenform.

Auf Grund der immer präziseren Definition der Fahrzeuge und deren Bestandteile als auch die zunehmende Einbeziehung von Funktionsbereichen neben den Entwicklungsbereichen (zum Beispiel: Fertigung) gewinnt das Anforderungsmanagement verstärkt an Bedeutung. Dies bleibt nicht ohne Wirkung auf den Entwicklungsprozess. Teilprozesse werden neu definiert und neue Rollen mit Schwerpunkt auf dem Anforderungsmanagement entstehen [ScRe-07].

### 2.1.3 Informationstechnologie

Derzeit gibt es weit mehr als 30 RM-Tools auf dem Markt zu kaufen. Dazu gehören CaliberRM (Borland), DOORS (Telelogic), Rational RequisitePRO (IBM) und Teamcenter Requirements (UGS), um nur einige zu nennen (siehe auch <http://www.paper-review.com/tools/rms/read.php> und [AIK1-06, Seite 14]). Als quasi Standard hat sich bei den deutschen Automobilherstellern und deren Zulieferern das Produkt DOORS von der Firma Telelogic durchgesetzt.

Trotz des Leistungsumfangs der existierenden RM-Tools mangelt es laut Aussagen der OEM und Zulieferer immer noch an der Integration dieser Werkzeuge in die unternehmensinterne IT-Landschaft. General Motors setzt im Gegensatz hierzu auf eine Eigenentwicklung (PQMS) basierend auf Teamcenter Requirements. Man erhofft sich davon eine bessere Integration in die UGS geprägte IT-Landschaft.

Trotz der Anwendung von RM-Tools werden die Daten zwischen den OEMs und den Zulieferern noch immer über Dateien ausgetauscht. Eine direkte online Kopplung eines Zulieferers mit einem OEM gibt es zur Zeit noch nicht.

Aus der Überlegung heraus Software in der Automobilindustrie zu standardisieren wurde 2004 die Herstellerinitiative Software (HIS) gegründet. Die Mitglieder dieser Vereinigung sind die Automobilhersteller Audi, BMW, DaimlerChrysler, Porsche und Volkswagen. Im Rahmen einer Initiative zur Standardisierung von Anforderungen wurde ein Requirements Interchange Format (RIF) als Standard definiert ( [www.automotive.his.de/rif](http://www.automotive.his.de/rif) und [Reck-07]).

RIF ist durch ein XML-Schema definiert und bietet ein Format beziehungsweise ein Datenmodell, das Strukturen für Anforderungen, deren Attribute, Typen, Zugriffsrechte und Relationen enthält. Die Version 1.0 wurde 2005 freigegeben, Version 1.1 existiert aktuell als Pre-Release.

RIF soll den toolunabhängigen Austausch von Anforderungen ermöglichen. Der Austausch soll bidirektional (OEM <--> Zulieferer) und asynchron erfolgen können.

### 2.1.4 Motivation

Zu den wichtigsten Gründen der OEMs Anforderungsmanagement intensiver als bisher im Fahrzeugentwicklungsprozess zu verankern gehören:

- Aufwandsreduzierung bei der Produktdefinition durch die Wiederverwendung von Anforderungen
- Verringerung des administrativen Aufwands durch konzernweite, einheitliche und transparente Ablage der Anforderungen
- Frühzeitige Einbindung der Zulieferer in Fahrzeugprojekte bei gleichzeitiger Verbesserung der Vertragsgrundlage durch intensivere Einbindung der Zulieferer in den RM-Prozess
- Begegnung der zunehmenden Produktkomplexität in der Mechatronik

## 2.2 Problemstellung

Die Anforderungen an das Produkt Fahrzeug nehmen bekanntlich kontinuierlich zu und auch die damit verbundene Komplexität. Die Schwierigkeit, mit denen die Ingenieure folglich konfrontiert werden, liegt hauptsächlich an den derzeit zum Einsatz kommenden IT-Werkzeugen. Drei Gruppen von IT-Werkzeugen sind in diesem Zusammenhang zu nennen.

Die erste Gruppe zielt auf Tools ab, deren Fokus auf der graphischen Repräsentation des Produktes ist. Gemeint sind hier Computer-Aided-Design- (CAD) Werkzeuge und Virtual-Reality- (VR) Werkzeuge, wobei VR als eine Sonderform der Repräsentation von CAD-Daten anzusehen ist. Was mit diesen Tools visualisiert wird, sind in erster Linie Geometriedaten. Der Anteil der beschreibenden Daten beschränkt sich meistens auf administrative Daten des betroffenen Produktbestandteils wie zum Beispiel die Projektnummer, der Dateiname oder die zu verwendenden Materialien. Was diese Systeme derzeit nicht anzeigen, sind Informationen aus dem Anforderungsmanagement. Dazu zählen die Anforderungen des dargestellten Teils als auch dessen Bezug zu seiner Umgebung. Zudem befinden sich die Daten in unterschiedlichen Systemen und oftmals auch unterschiedliche Strukturen. Anforderungen werden für gewöhnlich mit Anforderungsmanagement-Werkzeugen (datenbankgestützt) oder teilweise auch noch in Textdokumenten verwaltet. Konstruktionsdaten mit entsprechenden CAD- Werkzeugen. Weder die Werkzeuge noch die entsprechenden Daten sind derzeit miteinander verknüpft.

Die zweite Gruppe der IT-Systeme betrifft den Bereich des Computer-Aided-Engineering (CAE)<sup>16</sup>. Viele Aussagen über das Produktverhalten können heute schon auf dem Rechner simuliert werden. Beispielsweise die Fahrdynamik, das Crashverhalten, ergonomische Untersuchungen, Enteisierungssimulation, Signalverhalten auf Bussystemen und vieles mehr. Trotzdem stellen die Simulationswerkzeuge Insellösungen in der IT-Landschaft eines Automobilunternehmens dar. Den informationstechnischen Bezug zu Produktanforderungen sucht man vergeblich.<sup>17</sup>

Die dritte und wohl am meisten betroffene Gruppe von IT-Systemen sind die Product Data Management (PDM) Systeme beziehungsweise die Produkt Life-Cycle Management (PLM) Systeme. Während PDM sich auf den Zeitrahmen der Produktentwicklung beschränkt, betrachtet PLM den gesamten Lebenszyklus des Produktes, das heißt einschließlich der Nutzung durch den Kunden sowie die Entsorgung und Verwertung.

EIGNER und STELZER definieren PDM wie folgt:

*„PDM ist das Management des Produkt- und Prozessmodells mit der Zielsetzung, eindeutige und reproduzierbare Produktkonfigurationen zu erzeugen.“ [EiSt-01, Seite 21]*

Diese Definition beinhaltet die drei Zielsetzungen von PDM-Systemen:

- Das Management von produktbezogenen Daten wie zum Beispiel Zeichnungen, 3-D Modelle, textuelle Dokumente oder Produktstamm- und -strukturdaten
- Das Prozessmanagement, wobei die Komponente des Workflowmanagements hierbei am stärksten ausgeprägt ist
- Das Konfigurationsmanagement, welches Auskunft über vergangene, den aktuellen und künftige Bauzustände des Produktes verwaltet

Speziell in der Automobilindustrie sind PDM-Systeme heutzutage Stand der Technik. In Bezug auf das Anforderungsmanagement lassen sie allerdings noch immer einige Themen offen:

- Übergang von datengeprägter Produktbeschreibungen hin zu semantischen Produktbeschreibungen. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist die zumindest notwendige, wenn nicht sogar hinreichende, Beschreibung der Eigenschaften und Merkmale des Produktes sowie seiner Bestandteile

---

<sup>16</sup> mit CAE-Systemen sind an dieser Stelle computergestützte Simulationswerkzeuge der technischen Berechnung gemeint.

<sup>17</sup> mit einigen Ausnahmen im Bereich der Elektrik/Elektronik

- Übersetzung (unscharfer) Kundenanforderungen in technische Anforderungen. Zudem kommt hinzu, dass Kundenanforderungen einen stark subjektiven Charakter besitzen und weiterhin durch viele äußere Faktoren (zum Beispiel: Markttrends) beeinflussbar sind
- Konkurrierende Anforderungen an das Produkt und/oder unter den Produktbestandteilen. Diese Art von Management ist besonders schwierig, da Anforderungen einerseits nur bedingt objektivierbar sind und andererseits politische Einflüsse der Entscheidungsträger eine wesentliche Rolle spielen
- Übergang von statischen Produktstrukturen zu dynamischen Produktstrukturen welche den Lösungskonzepten folgen, die auf dynamischen Anforderungen basieren
- Kontinuierliche, das heißt durchgängige Anforderungsbeschreibung, im Besonderen in der frühen Phase der Produktentwicklung
- Die Erstellung der Produktdefinition unter Berücksichtigung existierender technischer Lösungen

## **2.3 Wissenschaftliche Ansätze**

In diesem Abschnitt sollen existierende wissenschaftliche Ansätze für das Anforderungsmanagement vorgestellt werden. Aus der Vielzahl der Veröffentlichungen wurden die nachfolgenden Schriften auf Grund der Zielsetzung und der Abgrenzung der jeweiligen Arbeit ausgewählt.

### **2.3.1 Ahrens**

Die an der TU Berlin im Fachbereich Maschinenbau und Produktionstechnik von AHRENS erstellte Dissertationsarbeit liefert die zur Zeit wohl umfassendste Übersicht über Methoden zur Erfassung und Handhabung von Produkthanforderungen [Ahre-00]. In ihr werden Analyse Kriterien zur Bewertung existierender wissenschaftlicher Ansätze definiert. Unter anderem sind dies die Transformationsdimension, die Konkretisierungsdimension sowie die Handhabungsdimension. Erstere berücksichtigt die Übersetzung der Kundenanforderungen in technische Anforderungen. Die Konkretisierungsdimension setzt den Fokus auf das Klären und Präzisieren der Anforderungen, und schließlich bewertet die Handhabungsdimension die Handhabung der Anforderungen. AHRENS beurteilt nach diesen

Kriterien mehrere Kategorien von Ansätzen. Untersucht man jeweils für die drei genannten Dimensionen, welche Ansätze die maximale Bewertungspunktzahl ([Ahre-00, Anhang A]) erhalten, so ergibt sich folgendes Bild (Tabelle 1).

<b>Dimension / Ansatz nach ...</b>	<b>Transformations- dimension</b>	<b>Konkretisierungs- dimension</b>	<b>Handhabungs- dimension</b>
Pahl / Beitz		x	x
Ulrich / Eppinger	x		
Ehrlenspiel	x	x	x
Danner / QFD	x	x	
Ullmann	x		
Pugh			x
Urban / Hauser	x		
Otto	x		

*Tabelle 1: Stärken der einzelnen Ansätze in den drei Dimensionen („x“ = maximal erzielte Bewertungspunktzahl; Grundlage: [Ahre-00])*

Neben dieser Bewertung der Ansätze ergibt eine genauere Betrachtung der Analysen von AHRENS, dass bezüglich der Transformations- und Konkretisierungsdimension die meisten Ansätze auf einer Methode mit dem Namen „Quality Function Deployment (QFD)“ aufbauen beziehungsweise Varianten davon sind.

Wie schon erwähnt, berücksichtigt die Konkretisierungsdimension die Klärung und Präzisierung der Anforderungen. Dies geht einher mit der Qualität und Vollständigkeit der Anforderungen. Man bedient sich hierbei Leitlinien [Ahre-00, Seite 28] und Anforderungsklassifikationen einschließlich Checklisten [Ahre-00, Seite 35] sowie auch hier der QFD-Methode.

Bei der Handhabung der Anforderungen ist die Komplexität ein grundsätzliches Thema. Diese ergibt sich aus dem Umfang sowie der Dynamik der Anforderungen. Die Komplexität bezüglich des Anforderungsumfangs begegnet man hier durch Strukturierung nach Themen und Organisationsformen [Ahre-00, Seite 29, Seite 35-36, Seite 60]. Der Dynamik, das heißt den Änderungen der Anforderungen während der Entwicklung, begegnet man dadurch, dass diese unter den Änderungsdienst gesetzt werden [Ahre-00, Seite 36].

### 2.3.2 Quality Function Deployment

Quality Function Deployment (QFD) ist eine Methode aus der Qualitätssicherung. Ziel der Methode ist die Konzeption, die Erstellung und der Verkauf von Produkten und Dienstleistungen, die der Kunde wirklich wünscht. Die Vorgehensweise wird vor allem in der Konzept- und Produktentwicklung eingesetzt [Akao-92]. Sie wurde erstmals in den 60er Jahren in Japan von AKAO entwickelt. Er wollte mit ihrer Hilfe während der Produkterstellung die Zusammenhänge zwischen den Anforderungen an ein Produkt über die verschiedenen Konkretisierungsstufen transparent und nachvollziehbar dokumentieren.

Grundlegender Ansatz ist die Verbindung verschiedener Begriffswelten über Matrizen [Ehrl-95, Seite 184 ff.]. Die Erstellung der Matrizen folgt im Grundprinzip einer einfachen Was-Wie-Fragestellung. Die Anforderungen werden hierbei in den Zeilen und die (technischen) Merkmale in den Spalten aufgetragen. In den Randbereichen der Matrix finden sich zusätzliche Informationen wie beispielsweise Wechselwirkungen der Merkmale, Bewertungen und Zielwerte. Die Relationen in der Matrix sind gewichtet. Die Matrix in Verbindung mit den zusätzlichen Informationen werden in einem sogenannten *House of Quality* (Abbildung 6) dargestellt.

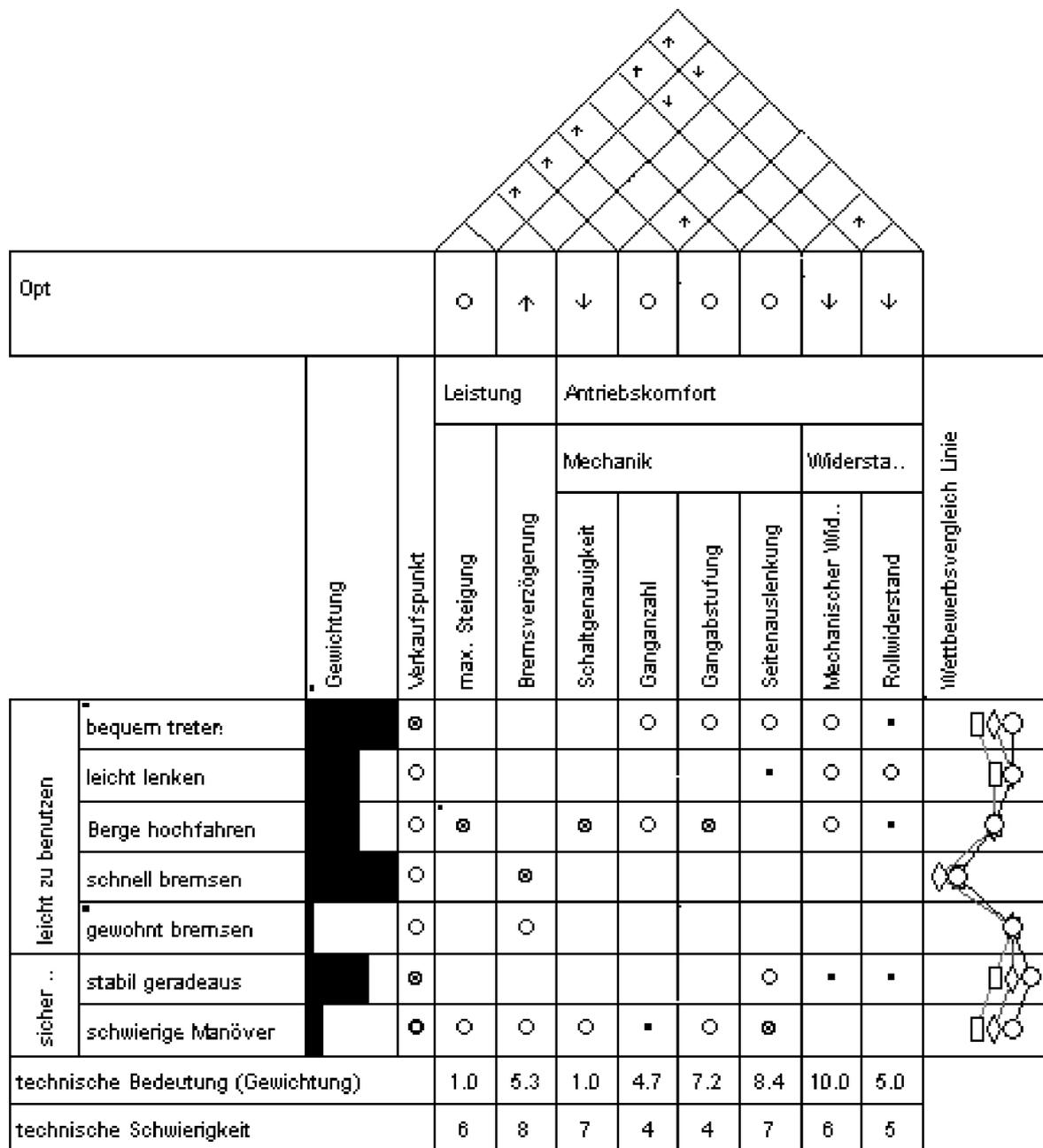


Abbildung 6: House of Quality (Beispiel, Quelle: www.qualica.de)

### 2.3.3 Jörg

In einem am Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion<sup>18</sup> des Fachbereichs Maschinenbau an der Universität Karlsruhe von JÖRG verfassten Beitrag werden linguistische Methoden bei der Erfassung und Integration von Produktanforderungen behandelt [Joer-05]. Die Arbeit von JÖRG wurde bei Daimler Chrysler erstellt und führte zur Entwicklung des Requirements Management-Systems „ReMaS“.

Das Ausgangsproblem in seinen Betrachtungen beruht auf der Tatsache, dass natürlich sprachliche Anforderungsdefinitionen oft nicht hinreichend präzise formuliert sind und daher zu Fehlinterpretationen führen.

Das vorgeschlagene Konzept einer linguistischen Analyse von Produktanforderungen soll unter anderem durch Klassifizierung und Standardisierung der verwendeten Begriffe die Produktanforderungen von der qualitativen Ebene auf eine quantitative Ebene transformieren.

In seiner Arbeit wurden Ansätze aus den Bereichen Konstruktionsmethodik und Anforderungsmodellierung analysiert und verfügbare Software aus universitärem und kommerziellem Bereich hinsichtlich der Handhabung von Anforderungen evaluiert.

Kernaussage der Analyse ist, dass zwischen den betrachteten Lösungsansätzen und den verfügbaren kommerziellen Werkzeugen eine Lücke klafft, die eine direkte praktische Umsetzung verhindert. Die wissenschaftliche Methodik geht teilweise von Annahmen aus, die in der Praxis nicht gegeben sind, wie zum Beispiel die genaue Kenntnis der Produktfunktionen oder die Verfügbarkeit aller Anforderungen.

Es wurde ein Ansatz entwickelt, der es ermöglicht, Anforderungen aus Texten zu extrahieren, zu interpretieren und vereinzelt in das Anforderungsmodell zu überführen. Produktanforderungen stehen im Zentrum des Konzepts. Deren kleinste Einheit ist die Anforderung in eindeutiger und vereinzelter Form. Unter der Annahme, dass die Anforderung in besagter Form vorliegt, ermöglicht die linguistische Analyse die automatische Klassifizierung der Anforderungen. Der Begriffsabgleich der Wörter aus der linguistischen Analyse geschieht mit Hilfe eines Wortnetzes.

Wortnetze beschreiben eine computergestützte Erfassung von Wörtern und deren Beziehungen. In lexikalisch semantischen Wortnetzen werden die wichtigsten Wörter und ihre bedeutungstragenden Beziehungen abgebildet, das heißt, man verknüpft Wörter mit ähnlichen Sinngehalt. Im Gegensatz zu einem Lexikon oder Thesaurus wird versucht, in einem Wortnetz ein Abbild der Struktur des

---

<sup>18</sup> heute: Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen unter Leitung von Frau Prof. Ovtcharova

menschlichen lexikalischen Gedächtnisses zu schaffen. In der Arbeit von JÖRG wurde das Wortnetz GermaNet<sup>19</sup> der Universität Tübingen eingesetzt. GermaNet ist ein Wortnetz für die deutsche Sprache.

Ferner wurde in der Implementierung ein Constraint Solver eingesetzt, welcher die Abhängigkeiten zwischen quantitativen Anforderungen prüft und auflöst. Er wurde exemplarisch an einem Brennraumoptimierungsproblem demonstriert. Seine Anwendung gestaltet sich auf Grund der Komplexität in Folge einer hohen Anzahl von Anforderungen und Randbedingungen als schwierig. Weiterhin waren die Abhängigkeiten oft mathematisch nichtlinear oder über- bzw. unterbestimmt.

### 2.3.4 Weber

In einem Beitrag von WEBER , WERNER, DEUBEL vom Institut für Konstruktionstechnik/CAD der Universität Saarbrücken wird eine Methode mit dem Namen „Characteristics-Properties Modelling/Property-Driven Development/Design (CPM/PDD)“ vorgestellt [WWD-05]. In dem vorgeschlagenen Modell werden sowohl die Merkmale und Eigenschaften als auch deren Beziehung untereinander in den Mittelpunkt gestellt.

WEBER definiert Merkmale (Characteristics) als etwas, das die Struktur, Gestalt und Beschaffenheit des Produktes charakterisiert und vom Konstrukteur beeinflusst werden kann. Dem gegenüber stehen Eigenschaften (Properties), die ein bestimmtes Verhalten des Produktes definieren und nicht direkt vom Konstrukteur beeinflusst werden können [WWD-05, Seite 13]. Eigenschaften und Merkmale werden über eine Transformationsmatrix zueinander in Beziehung gesetzt.

Der Ansatz beschreibt weiterhin zwei Vorgehensweisen: Die Analyse und die Synthese. Bei der Analyse werden die Eigenschaften durch bekannte oder gegebene Merkmale bestimmt. Die Synthese, die auch als Inversion des Analysemodells bezeichnet wird, bestimmt die Merkmale auf Grund gegebener oder geforderter Eigenschaften (Abbildung 7).

Der Ansatz beschreibt auch das Wechselspiel zwischen der Synthese und der Analyse, wie sie in der Praxis auftritt: Eigenschaften treiben die Merkmale, welche die konstruktive Lösung bestimmen. Die Ist-Werte der Lösung wirken dann ihrerseits auf die Eigenschaften. Die Differenz aus Soll-Eigenschaften und Ist-Eigenschaften treibt dann wiederum die Merkmale, so lange, bis die endgültige Lösung gefunden ist.

---

19 GermaNet, Seminar für Sprachwissenschaft, Universität Tübingen, <http://www.sfs.uni-tuebingen.de/lsd/>

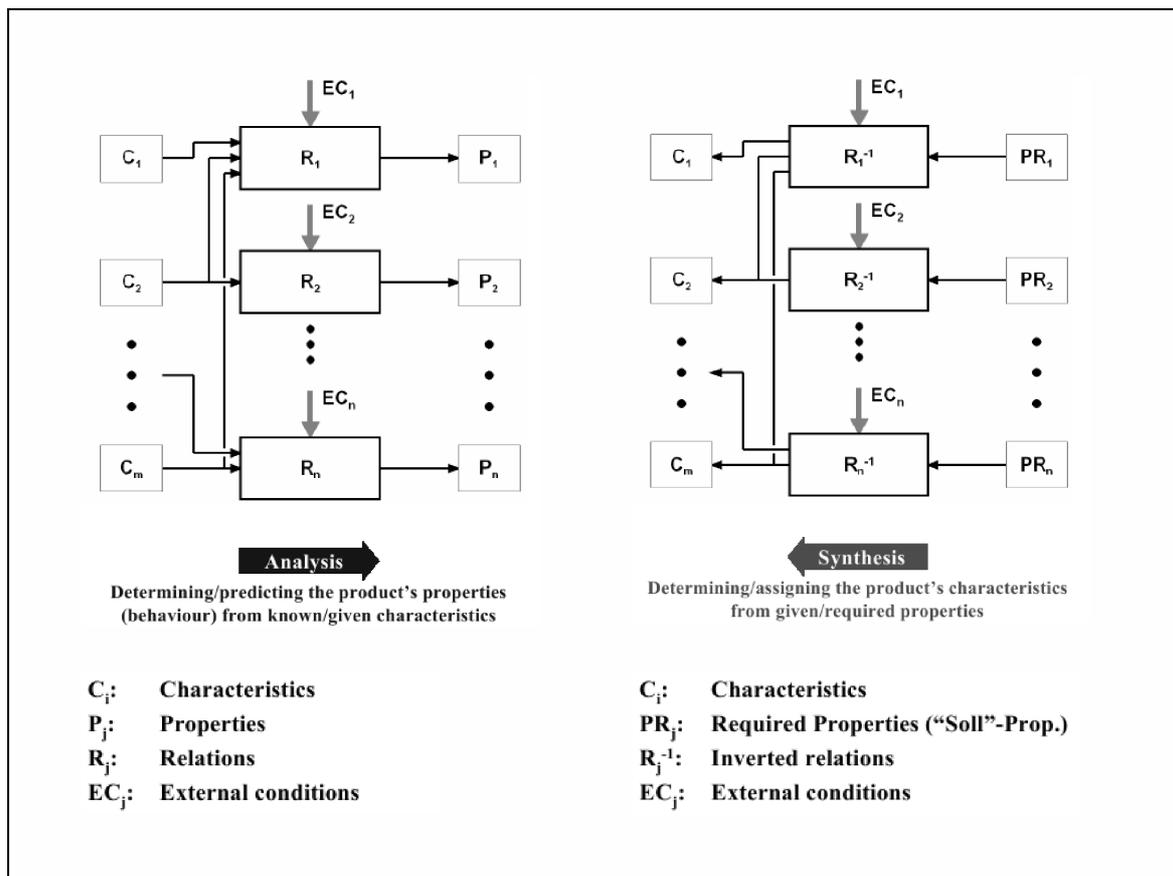


Abbildung 7: Analyse: Bestimmung von Eigenschaften aus Merkmalen /  
Synthese: Bestimmung von Merkmalen aus Eigenschaften  
Quelle: [WWD-05, Seite 26 und 36]

### 2.3.5 Jorgensen

In einem Workshop zur Produktstrukturierung stellte JORGENSEN vom Department of Production der Universität Aalborg in Dänemark einen Beitrag zur Modellierung auf mehreren Abstraktionsebenen vor [Jorg-04]. Dieser konzentriert sich auf die synthetische Modellierung, das heißt auf die Modellbildung von Systemen, bevor diese physisch gebaut werden. Die Motivation für sein Modell liegt in der Tatsache begründet, dass die heutigen Modellierungswerkzeuge proprietäre IT-Werkzeuge darstellen. Zwar gibt es Standardisierungsinitiativen (zum Beispiel: STEP/ISO 10303) für die zugrunde liegenden Datenmodelle und Dateiformate, jedoch sind diese Standards stark analytisch ausgerichtet, das heißt, sie wurden vorzugsweise für die Repräsentation von Produktdaten aus physischer Sicht entwickelt. Das bedeutet allerdings nicht, dass sie nicht geeignet wären,

synthetische Modelle zu repräsentieren. Jedoch gibt es mehrere Aspekte, welche die synthetische Modellierung erschweren oder teils sogar verhindern. Einer der Gründe ist die Modellierung auf verschiedenen Abstraktionsebenen.

Als Voraussetzung für sein Modell wird der Mechanismus der „Abstraktion“ einschließlich seiner beiden Unterklassen „Komposition“ und „Klassifikation“ definiert. Der Mechanismus Komposition, welcher selbst die Untermechanismen Aggregation und Separation umfasst, dient der Erzeugung von Komponenten-Hierarchien. Der Mechanismus Klassifikation mit den Untermechanismen Generalisierung und Spezialisierung ist notwendig zur Bildung von Typ-Hierarchien.

JORGENSEN schlägt in seinem Modell, abgeleitet aus der General Systems Theory sowie der Objektorientierten Modellierung, eine sogenannte Generic Information Model Component (GIMC) vor. Die GIMCs besitzen zwei Arten von Attributen: Solche, die den Zustand und solche, die das Verhalten des GIMC beschreiben. Weiterhin wird zwischen für andere GIMCs sichtbaren und verdeckten Attributen unterschieden. Träger von Komponentenspezifikationen sind sogenannte GIMC-Typen. Diese bilden gleichzeitig den primären Inhalt des Informationsmodells und bilden die Taxonomie der identifizierten GIMC-Typen.

Die GIMC-Typen, zusammen mit zwei Arten von Beziehungen, den „Referenzen“ und den „Kollektionen“, erlauben alle notwendige Strukturen des Informationsmodells zu erzeugen.

### 2.3.6 Gebauer

In der von GEBAUER veröffentlichten Dissertationsarbeit, entstanden am Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion des Fachbereichs Maschinenbau an der Universität Karlsruhe, wird ein Konzept für die kooperative Produktentwicklung auf Basis verteilter Anforderungen vorgestellt [Geba-01]. Eine Implementierung des Konzepts soll die Zusammenarbeit beim Anforderungsmanagement zwischen auftraggebendem Unternehmen und den Zulieferern verbessern. Kern des Konzeptes sind semantische Anforderungsnetze, die aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz abgeleitet wurden.

*„Ein semantisches Netz ist das mathematische Modell einer Menge von begrifflichen Entitäten und der zwischen diesen bestehenden kognitiven Beziehungen“ [Geba-01, Seite 45].*

Zur Darstellung der semantischen Anforderungsnetze nutzt GEBAUER Graphenstrukturen aus der Informatik. Die zwei zugrunde liegenden Elementtypen sind Knoten und Kanten. In den Anforderungsnetzen repräsentieren die Knoten die Anforderungen und die Kanten ihren Abhängigkeiten.

Die Kanten, das heißt die Abhängigkeiten, können gerichtet sein, wobei GEBAUER die Richtung mit einer Rangordnung belegt:

*„Gerichtete Beziehungen bestehen, wenn eine Rangordnung vorliegt. Ungerichtete Beziehungen bestehen, wenn die zwei Anforderungen gleichrangig behandelt werden können, das heißt, sie beeinflussen sich gegenseitig, die Auswirkungen bei Veränderungen der jeweiligen Anforderungen sind symmetrisch.“ [Geba-01, Seite 48]*

In seiner Arbeit unterscheidet GEBAUER insgesamt sechs Beziehungstypen: „zerlegt sich“, „setzt sich zusammen aus“, „erzeugt aus“, „unterstützend“, „konkurrierend“ und „gegensätzlich“ (Abbildung 8, Seite 29).

Zur Erstellung der semantischen Anforderungsnetze werden vier unterschiedliche Vorgehensweisen definiert: Neu-, Funktions-, Prinzip- und Gestaltkonstruktion (auch Herstellkonstruktion genannt). Die Anforderungsnetze unterscheiden sich dahingehend, ob sie Lösungsstrukturen enthalten, die sich anschließend bis zu den tatsächlichen Produkteigenschaften entwickeln, oder ob sie lösungsneutral beschrieben sind.

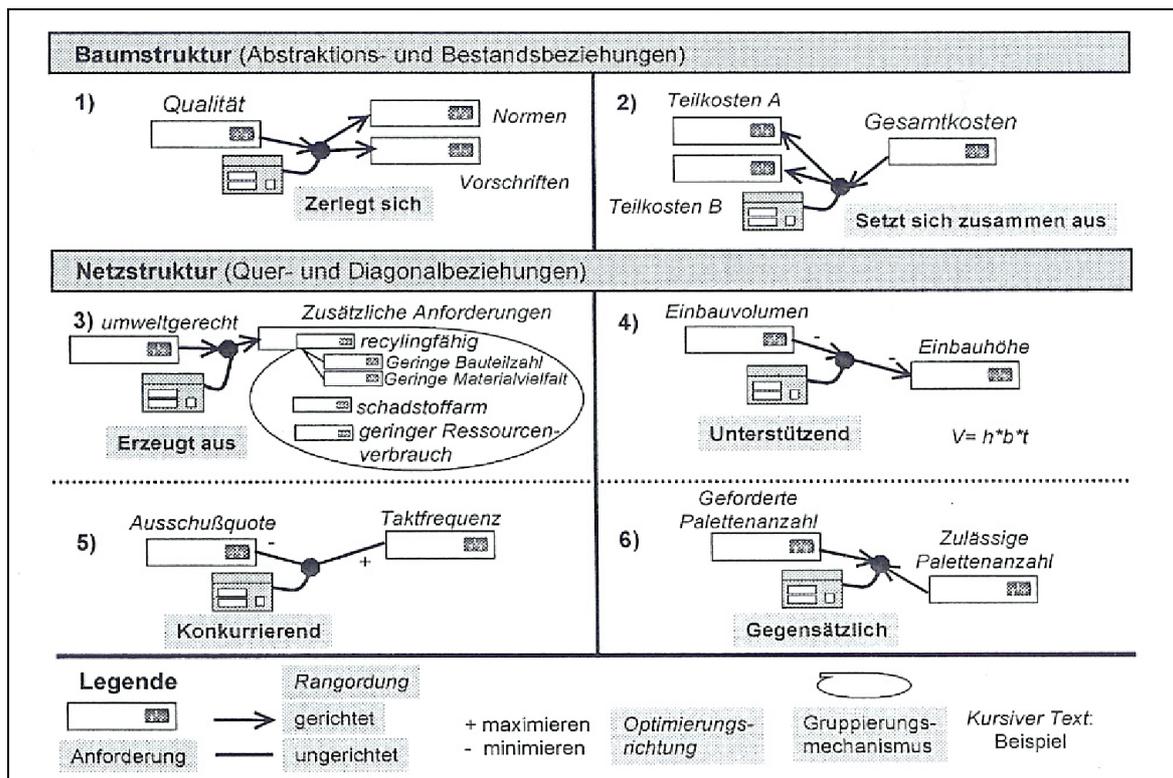


Abbildung 8: Kantenbeschreibung des Graphen durch unterschiedliche Beziehungstypen. Quelle: [Geba-01, Seite 51]

### 2.3.7 Krusche

An der Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik der technischen Universität Braunschweig entstand eine Dissertation über die „Strukturierung von Anforderungen für eine effiziente und effektive Produktentwicklung“. KRUSCHE führt Schwachstellen der durchgängigen Nutzung von Anforderungen auf und sieht diese in methodischen Defiziten, in organisatorischen Defiziten innerhalb der Unternehmen sowie in Defiziten bei der Rechnerunterstützung. In seiner Arbeit untersucht er sieben existierende Ansätze zur Anforderungsstrukturierung. KRUSCHE unterscheidet zwischen der Anforderungsentwicklung und Anforderungsverarbeitung. Die Analyse seiner Arbeit zeigte, dass die unterschiedlichen Sichtweisen und Ziele der Arbeiten auch unterschiedliche Vorschläge über die Art und den Umfang der Unterstützung des Lösungsprozesses durch Anforderungen zur Folge haben. Seiner Ansicht nach eignen sich die untersuchten Methoden nicht für die Klassifikation von Anforderungen zum Zwecke der Anforderungsverarbeitung. Eine operativ geeignete Strukturierung von Anforderungen sei nur begrenzt nach streng logischen Gesichtspunkten durchführbar. Aus diesem Grund schlägt KRUSCHE eine pragmatische Vorgehensweise für die

Einteilung und Beziehungsanalyse vor, die in weiten Bereichen von der gestellten Aufgabe abhängig ist und dem Anwender einen Anwendungsspielraum einräumt. Eine wichtige Aussage ist:

*„Entscheidend für eine effiziente Verarbeitung von Anforderungen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses ist nicht die vollkommen eindeutige Einteilung von Anforderungen bzw. vollständige Analyse ihrer Beziehungen, sondern das entsprechende Wissen über Präferenzen und Abhängigkeiten schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Produktentwicklung.“ [Krus-00, Seite 166]*

### 2.3.8 STEP

Die Abkürzung steht für „STandard for the Exchange of Product model data“ und ist eine von der International Standards Organisation (ISO) initiierte Schnittstellennorm, die mit der ISO 10303 veröffentlicht wurde. Es handelt sich hierbei um einen Standard zur Beschreibung von Produktdaten, für deren Darstellung und den Austausch zwischen unterschiedlichen CAx-Systemen. Es sollen möglichst alle Produktdaten eines Produktes vom Erstentwurf bis hin zum Recycling abgedeckt werden. Davon betroffen sind Unternehmensbereiche wie die Konstruktion, die technische Berechnung, die Fertigung, die Montage, die Qualitätssicherung, und darüber hinaus auch, nach dem Kauf des Produktes durch den Kunden, die Nutzung und die Wartung.

Dieser Standard liegt in der Verantwortung des ISO Technical Committee TC 184, Subcommittee SC4. Daneben hat sich eine internationale Branchengemeinschaft (ProSTEP iViP-Verein) aus mehr als 200 Unternehmen zur Aufgabe gesetzt, die Implementierung von STEP in marktgängige Produkte und Dienstleistungen zu fördern (siehe auch <http://www.prostep.org/de/standards/was/aufbau/>).

Das Produktmodellkonzept von STEP beruht auf der Erzeugung eines Gesamtmodells, das sich in Paritalmodelle mit bestimmten abgegrenzten Informationsinhalten gliedert, die über Verknüpfungen in Beziehung zueinander stehen.

Die ISO 10303 ist in einer Reihe von einzelnen Dokumenten, den sogenannten „Parts“, veröffentlicht. Die Reihe ist wie folgt aufgebaut<sup>20</sup>:

---

<sup>20</sup> <http://www.prostep.org/de/standards/was/aufbau/>

### **Beschreibungsmethoden (ISO 10303-1x)**

Den Beschreibungsmethoden liegt die Datenmodellierungssprache EXPRESS zugrunde. Sie arbeitet nach dem objektorientierten Ansatz und hat Objekte mit Eigenschaften, Vererbungs- und Integritätsregeln, Objektklassen und Beziehungen zwischen Objektklassen als Inhalt. Weiterhin enthält diese Reihe die Methode EXPRESS-X, die es ermöglicht, zwei EXPRESS-Datenmodelle ineinander abzubilden.

### **Implementierungsmethoden (ISO 10303-2x)**

Diese Reihe definiert das Dateiformat (Step Physical File Format) für den Datenaustausch. Als Grundlage für die Datenintegration wird auch die Datenzugriffsmethode SDAI (Standard Data Access Interface) bereitgestellt.

Den Methoden schließen sich Datenmodelle an. Es wird unterschieden zwischen den STEP-Basismodellen und allen anderen, auf den Basismodellen aufbauenden STEP-Datenmodellen.

### **Integrated Resources Basismodelle (40/50er-Reihe, ISO 10303-4x, -5x)**

Die Basismodelle beschreiben jeweils (auch in mehreren EXPRESS-Schemata) die Grundelemente für folgende Datenklassen:

- Produkt-Identifikation und -Konfiguration
- Geometrie- und Topologiebeschreibung
- Darstellungsstrukturen
- Produkt-Struktur und -Konfiguration
- Material
- Visuelle Darstellung
- Toleranzen
- Prozess-Struktur und -Eigenschaften
- Mathematische Konstrukte und Beschreibungen

Alle anderen Modelle bauen auf diesen Basismodellen auf:

### **Anwendungsmodelle mit allgemein gültigem Inhalt (ISO 10303-1xx)**

In diesen Modellen werden zum Beispiel Datenmodelle für Zeichnungen, Finite-Elemente-Methode oder Kinematik definiert.

### **Teilmodelle für verschiedene, komplexe Anwendungen (ISO 10303-5xx)**

In den Teilmodellen werden sogenannte AICs (Application Interpreted Construct) definiert, wie zum Beispiel für geometrische Beschreibungsmethoden (vom Drahtgitter- bis zum Volumenmodell) oder auch für geometrische Toleranzen.

### **Anwendungsprotokolle (ISO 10303-2xx)**

Anwendungsprotokolle spezifizieren jene Datenmodelle, die die Grundlage für Implementierungen sind. Jede STEP-Implementierung (zum Beispiel ein Datenaustauschprozessor) ist die Implementierung eines Anwendungsprotokolls. Laut ProSTEP iViP befinden sich aktuell sehr viele Anwendungsprotokolle in Bearbeitung. Zu den wenigen, die bisher den Reifegrad eines Internationalen Standards erreicht haben, gehört das AP214 (Core Data for Automotive Mechanical Design and Processes, ISO 10303-214). Darin werden viele Informationskomplexe des Entwicklungsprozesses abgedeckt, wie zum Beispiel Teile und Betriebsmittel, Produktinformations- und Konfigurationsdaten, Organisationsdaten, Eigenschaften von Teilen und Geometriebeschreibungen, um nur einige zu nennen.

Die Idee der Standardisierung von produkt- und prozessbeschreibenden Datenmodellen hat, speziell in der AP214 für die Automobilbranche, den Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Systemen erleichtert. Allerdings ist festzustellen, dass der Schwerpunkt auf dem Austausch von CAD-Daten liegt, was sich auch mit der Aussage von ProSTEP iViP hinsichtlich PDM deckt:

*„Im Bereich des PDM-Datenaustausches liegt bei weitem noch nicht der Umfang an Erfahrungen vor wie im CAD-Bereich. Dies liegt unter anderem daran, dass mit dem elektronischen Austausch von PDM-Daten in der Praxis erst begonnen wird. Erschwerend kommt hinzu, dass die Kommunikationsprobleme weniger an der falschen Einstellung oder der fehlenden Qualität der Prozessoren liegt, sondern vielmehr semantischer Natur sind.“* (<http://www.prostep.org/de/services/bp/pdm/>, 2006-07-21)

## 2.4 Zielsetzung

Vielen der oben vorgestellten Ansätzen ist zu entnehmen, dass die Semantik im Anforderungsmanagement eine bedeutende Rolle einnimmt. Nicht zuletzt beschäftigen sich die neueren Ansätze mit der semantischen Analyse von Anforderungen und Anforderungen im semantischen Netzwerk. Das Problem ist, dass die Entstehung der Semantik von Anforderungen noch nicht hinreichend erforscht ist. Daraus resultiert die erste Forderung an ein im Rahmen dieser Arbeit zu erstellendes Anforderungsmodell:

Forderung 1:

Das Modell muss die Entstehung von Semantik im Kontext von Produktanforderung unterstützen

Wie in den vorhergehenden Kapiteln schon erwähnt, stellt die Durchgängigkeit der Produktdaten über den gesamten Produktlebenszyklus noch immer eine große Herausforderung dar. Historisch bedingt sind aus speziellen CAx Aufgabenstellungen auch spezielle technische Anwendungen entstanden und ebenso deren spezifischen Datenbestände. Diese zweckspezifischen Anwendungen und deren spezifischen Daten sind oft nur schwach oder gar nicht gekoppelt („Insellösungen“). Daraus resultiert die zweite Forderung an das Modell:

Forderung 2:

Das Modell muss zur Verbesserung der Durchgängigkeit der Produktdaten innerhalb des Produktentwicklungsprozesses beitragen

Hierbei müssen mindestens die Daten im Zusammenhang mit den Anforderungen und der Überprüfung der Anforderungen an Hand der technischen Lösungen eingeschlossen sein.

Bei der Produktentwicklung, im Besonderen im Automobilbau, ist man bestrebt technische Lösungen wiederzuverwerten, am besten solche, die bereits technisch erprobt sind. Existierende technische Lösungen schränken die Freiheitsgrade der Entwickler und deren Kreativität massiv ein. Anforderungen einerseits und technische Lösungen andererseits führen meist zu Konflikten. In den betrachteten Ansätzen wird diese Problematik nur unzulänglich berücksichtigt. Die dritte Forderung lautet folglich:

Forderung 3:

Das Modell muss neben Produkthanforderungen auch (existierende) technische Lösungen berücksichtigen

## 2.5 Abgrenzung

In diesem Abschnitt wird die vorliegende Dissertationschrift innerhalb bestimmter Themenkreise der Produktentwicklung abgegrenzt.

### Abgrenzung innerhalb des Produktlebenszyklus

Der Gesamtprozess oder auch der Produktlebenszyklus lässt sich schematisch in sechs Abschnitte zerlegen: Produktplanung, Konstruktion, Erprobung, Serienfertigung, Nutzung (beim Kunden) und Recycling (siehe auch Abbildung 3, Seite 8). Für das Anforderungsmanagement liegt der Schwerpunkt auf den beiden Prozessschritten Produktplanung und Erprobung. Die Produktplanung wird weiter unterteilt in die Produktdefinition und in die Konzeption. Die Erprobung beinhaltet die Verifizierung und die Validierung<sup>21</sup>.

### Abgrenzung hinsichtlich der Beschreibungselemente

Für den ersten Teilprozess Produktplanung liegt der Fokus auf den Beschreibungselementen Anforderungen, Produkt und dessen Bestandteilen sowie die Beziehungen dieser Elemente zueinander. Von Relevanz für die Teilprozesse Konzeption sowie Verifizierung und Validierung sind die Prüfvorschriften und deren Bezug zum Produkt. Ein wichtiges Charakteristikum des Produktes ist dessen Reifegrad. Zwar ist diese Zustandsbetrachtung für den gesamten Produktlebenszyklus von Bedeutung, jedoch soll das Hauptaugenmerk auf die Zeiträume Produktplanung bis zum Abschluss des Teilprozesses Prüfung<sup>22</sup> gelegt werden, da in diesem Intervall die meisten Zustandsänderungen stattfinden.

Da die Anwendung der vorliegenden Arbeit exemplarisch Bezug zur Automobilindustrie nimmt, werden die Beschreibungselemente oftmals auch mit Begriffen aus dem Automobilbau besetzt.

---

21 Verifizierung = Überprüfung des Produktes gegen dessen Anforderungen;

Validierung = Prüfungsergebnis als gültig (und bindend) erklären (siehe auch Abbildung 9, Seite 43)

22 Die Begriffe „Prüfung“ und „Erprobung“ werden in dieser Arbeit synonym verwendet.

### **Abgrenzung gegenüber der Biologie (Natur)**

Die Biologie ermöglicht es, Analogien aus der Natur aufzuzeigen, welche in die Modellbildung einfließen. Dazu gehören im Besonderen die beiden Themenbereiche Evolution und Wachstum mit den Mechanismen der Spezialisierung und dem Informationsträger für das „Erbgut“.

### **Abgrenzung innerhalb der Informationstechnologie (IT)**

Die primär von dieser Arbeit betroffenen IT-Systeme stammen aus den Bereichen Requirements Management, Product Data Management (PDM) und Product Lifecycle Management (PLM).

Requirements Engineering Systeme sind die ureigensten Systeme in Bezug auf Anforderungen. Sie liefern Strukturen und Funktionen, die bei der Erstellung des Modells beachtet werden müssen.

PDM-Systeme sind relevant, weil sie ebenfalls den Integrationsgedanken verfolgen, das heißt Produktdaten aus unterschiedlichen Anwendungen zusammenführen. Schwäche der derzeitigen PDM-Systeme ist, dass diese im Wesentlichen nur konstruktions- und prüfrelevante Produktdaten verwalten (Stücklisten). Das Management von Produktdaten zu frühen Zeitpunkten, das heißt in der Planungsphase, wird selten oder gar nicht unterstützt.<sup>23</sup>

Im Zusammenhang mit PDM wird oft auch der Begriff Product Lifecycle Management (PLM) verwendet. Dieser ist sehr umfassend und zielt auf die Verwaltung aller Daten über und um das Produkt von der Produktidee bis zur Wiederverwertung ab. Im Gegensatz zu PDM ist heutzutage PLM noch eher eine Vision. Manche Hersteller von PDM-Systemen verwenden gerne diesen Begriff, obwohl im Wesentlichen nur Produktdaten während der Produktentwicklung verwaltet werden.

Nach Ilieva ist

*„... einer der Nachteile der heutigen Anwendung des PDM-Ansatzes darin zu sehen, dass bei der digitalen Abbildung und dem Managen von produktdefinierenden Daten keine Möglichkeit bzw. keine PDM-Funktion zur Abbildung der aus den Anforderungen resultierenden Informationen vorgesehen ist“ [Ilie-06, Seite 36].*

CAD- und VR-Systeme spielen neben den anderen CAx-Systemen eine bedeutende Rolle in der Produktentwicklung (Automobilbau). Sie müssen erwähnt werden, da sie einen wichtigen Beitrag zur Konstruktion des Produktes bzw. deren Präsentation liefern. Allerdings beschränken sich die Daten auf die Geometrie des Produktes.

---

<sup>23</sup> siehe auch [EiSt-01, Kapitel 5.11]



## 3 Konzept

Dieses Kapitel ist dreigeteilt. In Kapitel 3.1 werden die notwendigen Begriffe für das anschließende Modell definiert. In Kapitel 3.2 findet ein Exkurs in die Biologie statt, und es wird nach Parallelen aus der Natur Ausschau gehalten. Beide Kapitel liefern die notwendige Voraussetzung für Kapitel 3.3, in dem ein integratives Modell für das Anforderungsmanagement aufgebaut wird, welches die Produktentwicklung unterstützt.

### 3.1 Begriffsdefinition und Syntax

Im Gegensatz zur Mathematik oder Informatik sind die Begriffe in der Welt des Anforderungsmanagements bis dato weniger streng definiert. Um Klarheit, zumindest im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu schaffen, sollen hier einige grundlegende Begriffe erstmals definiert oder die Definitionen anderer Autoren verwendet und gegebenenfalls angepasst werden.

Das zentrale Element und gleichzeitig die Existenzberechtigung eines jeden Unternehmens bildet das *Produkt*. Es ist, in Anlehnung an [Rapp-99, Seite 7], wie folgt definiert:

#### **Definition 1:** Produkt

Das Produkt wird als Leistung in Form eines Gegenstandes verstanden.  
Der Gegenstand kann materieller oder immaterieller Natur sein.

Bezogen auf die Automobilindustrie wäre dies das Fahrzeug oder dessen Bestandteile. Hierbei muss das Produkt nicht zwingend in materieller Form vorliegen, sondern kann auch in Form von Daten, zum Beispiel in CAx- und/oder PDM-Systemen, existieren.

Wie im Kapitel 2.1 schon angedeutet, beschränkt sich diese Arbeit im Wesentlichen auf einen Teilabschnitt des Produktlebenszyklus, nämlich auf die *Produktentwicklung*. Für diesen Begriff soll eine schon existierende Definition aus dem iViP Projekt [KTA-01, Seite 172] herangezogen werden.

**Definition 2:** Produktentwicklung

Die Produktentwicklung ist der zeitliche Abschnitt des Produktlebenszyklus, der die Produktplanung, -konstruktion und -erprobung umfasst.

Von besonderem Interesse für das Anforderungsmanagement sind die Abschnitte Produktplanung und Erprobung. Zur Planung gehören die Produktdefinition und die Produktkonzeption. Während der Produktdefinition werden die Anforderungen an das Produkt und dessen Bestandteile festgeschrieben und in der anschließenden Konzeption potentielle technische Lösungen erarbeitet. In der Konstruktionsphase werden dann die technischen Lösungen mittels CAD ausgearbeitet. Diese werden anschließend entweder mittels Computer Aided Simulation (CAS) oder mittels physischer Prototypen hinsichtlich der Anforderungen durch Prüfungen verifiziert und die Ergebnisse validiert (siehe auch Abbildung 3, Seite 8).

Zwei weitere charakteristische Begriffe des Anforderungsmanagements sind *Eigenschaft* und *Merkmal*. Hierzu finden sich in der Literatur unterschiedliche Definitionen, welche sich manchmal sogar widersprechen ([Broc-01], [DIN 4000-1], [Geba-01], [Ovtc-97], [WeDe-02], [WWD-05], [Zwic-98]).

Nach diesen Quellen liefert WEBER [WeDe-02, Kapitel 2] die geeignetste Basis für beide Begriffe:

*„Die Eigenschaften beschreiben das Verhalten des Produktes (beispielsweise Gewicht, Sicherheit, Ästhetik, aber auch etwa Fertigungs-, Montage-, Prüf-, Umweltgerechtigkeit oder Kosten des Produktes). Sie sind von den Merkmalen, daneben aber auch noch von anderen Faktoren abhängig und können vom Produktentwickler nicht direkt, sondern nur mittelbar – über die Merkmale – festgelegt werden.“*

*„Die Merkmale eines Produktes definieren das Produkt, sie können vom Produktentwickler/Konstrukteur direkt festgelegt werden (z.B. Gestalt, Abmessungen, Werkstoff, ...).“*

Allerdings ist WEBER's Kriterium zur Unterscheidung zwischen Eigenschaften und Merkmalen die Beeinflussbarkeit durch den Menschen, genauer den Produktentwickler. Dieses Kriterium ist zu schwach für das Anforderungsmodell. Wesentlich wichtiger im Kontext des Anforderungsmanagements ist die Art der Beurteilung von Produktcharakteristika.

**Definition 3:** Eigenschaft

Eine Eigenschaft (P) ist eine Eigenheit des Produktes (zum Beispiel: Ästhetik, Verhalten, Sicherheit, aber auch Fertigungs-, Montage-, Umweltgerechtigkeit). Eigenschaften sind objektiv vorhanden, können jedoch nur subjektiv beurteilt werden.

**Definition 4:** Merkmal

Die Merkmale (F) eines Produktes definieren das Produkt. Sie können vom Produktentwickler direkt festgelegt (zum Beispiel: Abmessungen, Werkstoff, ...) und objektiv beurteilt werden.

Da Eigenschaften und Merkmale für sich allein noch keine Aussagekraft besitzen, weil diese nur in einem Kontext existieren können, wird hierzu der Begriff des *Produktelements* eingeführt.

**Definition 5:** Produktelement

Ein Produktelement (PE) ist der Platzhalter für eine oder mehrere technische Lösungen zu einer bestimmten Menge von Eigenschaften oder Merkmalen.

Dem Produktelement fällt eine Doppelrolle zu: Es ist der Träger von Eigenschaften und Merkmalen und definiert sich letztendlich darüber. Gleichzeitig ist es auch der Platzhalter für eine oder mehrere technische Lösungen. Mehrere technische Lösungen treten dann auf, wenn es zu dem Produktelement Varianten gibt.

Vorgreifend sei darauf hingewiesen, dass die Menge an Eigenschaften und Merkmalen auch leer sein kann, nämlich genau dann, wenn es sich um ein untergeordnetes Produktelement (pe) handelt, das auf Grund einer Lösungsanforderung erzeugt wurde und dem durch keine dritte Produkthanforderung Eigenschaften oder Merkmale zugewiesen wurden.

Ein weiterer Begriff, besonders im technischen Bereich, ist die *Funktion*. In der Konstruktionslehre verbirgt sich dahinter die Umwandlung von technischen Eingangsgrößen über ein (Teil-) System in Ausgangsgrößen.

*„In einem technischen System mit Energie-, Stoff- und Signalumsatz müssen sowohl eindeutige, reproduzierbare Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen des Gesamtsystems, der Teilsysteme, als auch zwischen den Teilsystemen selbst bestehen. Sie sind im Sinne der Aufgabenerfüllung stets gewollt (z.B. Drehmoment leiten, elektrische in mechanische Energie wandeln, Stofffluss sperren, Signal speichern). Solche Zusammenhänge, die zwischen Eingang und Ausgang eines Systems zur Erfüllung einer Aufgabe bestehen, nennt man Funktion.“ [BeKü-95, Seite F2]*

Der Begriff der Funktion ist zwar für das Anforderungsmodell nicht zwingend erforderlich, soll jedoch, da er oftmals in Verbindung zu Merkmalen steht, in einer verkürzten Fassung wie folgt definiert werden:

#### **Definition 6:** Funktion

Die Funktion von technischen Systemen besteht in der Überführung der Eingangsgrößen (Stoff, Energie, Signal) unter Berücksichtigung von Parametern in die umgewandelten Ausgangsgrößen (Stoff, Energie, Signal).

Um die Begriffe Funktion, Eigenschaft und Merkmal zu verdeutlichen, zwei Beispiele:

Das Airbag-System<sup>24</sup> hat die Funktion, Passagiere im Falle eines Zusammenstoßes vor Verletzungen zu schützen. Es besitzt hierzu die Eigenschaft, sich entfalten zu können. Hinsichtlich der Ein- und Ausgangsgrößen findet eine Umformung von chemischer Energie, gespeichert im Treibsatz, in Verformungsenergie des Airbags statt.

Ein anderes Beispiel ist das Bremssystem<sup>25</sup>. Seine Funktion ist es, das Fahrzeug abzubremsen. Die Verzögerung kann unter anderem über die Merkmale Scheibendurchmesser und Anpressdruck des Bremszylinders beeinflusst werden. Was bei einer Bremsung stattfindet, ist die Überführung von kinetischer Energie in thermische Energie.

Der zentrale Gegenstand des Anforderungsmanagements ist die *Anforderung* an sich. In der Literatur finden sich zahlreiche Definitionen. So zum Beispiel nach AHRENS:

---

<sup>24</sup> siehe auch [Bosc-03, Seite 1036 f.]

<sup>25</sup> siehe auch [Bosc-03, Seite 792 f.]

*„Eine Anforderung ist eine Vorgabe, deren Erfüllung den zielgerichteten Verlauf des jeweiligen Konstruktionsprozesses und/oder Eigenschaften des betreffenden Produktes bestimmt.“ [Ahre-00, Seite 213f.]*

Da der zielgerichtete Verlauf des Konstruktionsprozesses nicht immer garantiert werden kann, soll in dieser Arbeit die allgemeine Definition für Anforderung wie folgt lauten:

**Definition 7:** Anforderung

Eine Anforderung definiert einen Bedarf für die spätere Umsetzung einer Idee oder Konzepts in ein Produkt oder einen Service.

Anforderungen können weiter spezifiziert werden, wie zum Beispiel in Prozess- oder Produkthanforderungen. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich ausschließlich auf Produkthanforderungen. Diese werden wie folgt definiert:

**Definition 8:** Produkthanforderung

Eine Produkthanforderung (R) ist

- die Vorgabe von zu erfüllenden Eigenschaften oder Merkmalen zu einem Produktelement oder
- die Vorgabe zur Verwendung vorhandener Lösungen für Produktelemente.

Produkthanforderungen können gemäß Definition 8 ebenfalls auf vorhandene Lösungen abzielen, weil sehr oft existierende technische Lösungen wiederverwendet werden (so zum Beispiel, dass der Anlasser A der Firma B zur Anwendung kommen soll). Aber auch das Expertenwissen, dass bestimmte Bestandteile bestimmte Funktionen erfüllen. Etwa wenn Konstrukteure festlegen, dass in einem bestimmten Fahrzeug ein Schlossstraffer als Rückhaltesystem zur Anwendung kommen soll, da dieser gegenüber einem Schultergurtstraffer das Hindurchrutschen verhindert.

Eigenschaften und Merkmale unterscheiden sich hauptsächlich in der Art ihrer Beurteilung. Beide kommen in Produkthanforderungen vor. So wird in der Literatur zwischen qualitativen und quantitativen Anforderungen unterschieden (zum Beispiel: [Jörg-03, Seite 31], [GGK-99, Seite 61]). In Anlehnung an JOERG sollen für die Produkthanforderungen folgenden Definitionen gelten:

**Definition 9:** Qualitative Produktanforderungen

Qualitative Produktanforderungen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie nicht explizit auf eine Lösungseigenschaft zeigen und somit auch nicht direkt messbar sind. Eine eindeutige Beschreibung der gewünschten Lösungseigenschaft ist entweder nicht möglich (zum Beispiel: ästhetische Formgebung) oder zu aufwändig (zum Beispiel: korrosionsbeständig).

**Definition 10:** Quantitative Produktanforderungen

Quantitative Produktanforderungen können immer durch einen exakten Wert oder Wertebereich beschrieben und mit Hilfe technischer Verfahren geprüft werden.

Anforderungen im Allgemeinen und Produktanforderungen im Speziellen sollen in jedem Fall überprüfbar sein, jedoch besitzt die Unterscheidung zwischen qualitativen und quantitativen Produktanforderungen eher akademischen Charakter. In der Praxis, speziell in der PKW-Entwicklung, sind alle zulässigen Produktanforderungen prüfbar. Die Unterscheidung liegt hierbei vielmehr in Art der Prüfbarkeit, das heißt, ob diese objektiv oder subjektiv geprüft werden. In der Praxis lassen sich sowohl qualitative als auch quantitative Produktanforderungen prüfen, erstere jedoch nur subjektiv, während letztere objektiv geprüft werden können.

Im Rahmen der „Überprüfung“ der Produktanforderungen kommen immer wieder folgende vier Begriffe zur Anwendung: Prüfung<sup>26</sup>, Evaluierung, Verifizierung und Validierung<sup>27</sup>, die nicht selten zur Verwirrung führen.

Um zu sehen, ob ein Produkt die daran gestellten Anforderungen erfüllt, muss es geprüft werden. Der Vorgang nennt sich „Prüfung“.

Für Prüfungen werden Messungen vorgenommen. Die „Evaluierung“ stellt sicher, dass der Messvorgang fehlerfrei vonstatten gegangen ist.

Die Messergebnisse liefern Aussagen über die Erfüllung der Anforderungen, das heißt den Erfüllungsgrad der technischen Lösung. Diesen Vorgang nennt man „Verifizierung“.

Erfüllt die technische Lösung die Anforderungen nicht, nur teilweise, oder werden die Anforderungen gar übererfüllt, so resultieren daraus Risiken. Die Nicht-Erfüllung führt meistens zu massiven konzeptionellen Änderungen und dem damit ver-

---

<sup>26</sup> Synonym für „Prüfung“ ist „Test“.

<sup>27</sup> bzw. „Evaluation“, „Verifikation“ und „Validation“

bunden „Re-Design“. Unter-Erfüllung bedeutet Schwächen in der Produktqualität, Über-Erfüllung dagegen unnötige Kosten für den Hersteller und letztlich auch für den Kunden beim Erwerb. Alles in allem besteht ein mehr oder minder großes Risiko, falls das vorgegebene Ziel nicht genau erreicht wird. Im Rahmen des Risikomanagements werden Entscheidungen hinsichtlich der Akzeptanz der Verifizierungsergebnisse getroffen und als gültig erklärt. Dieser Vorgang wird auch als „Validierung“ bezeichnet (Abbildung 9).

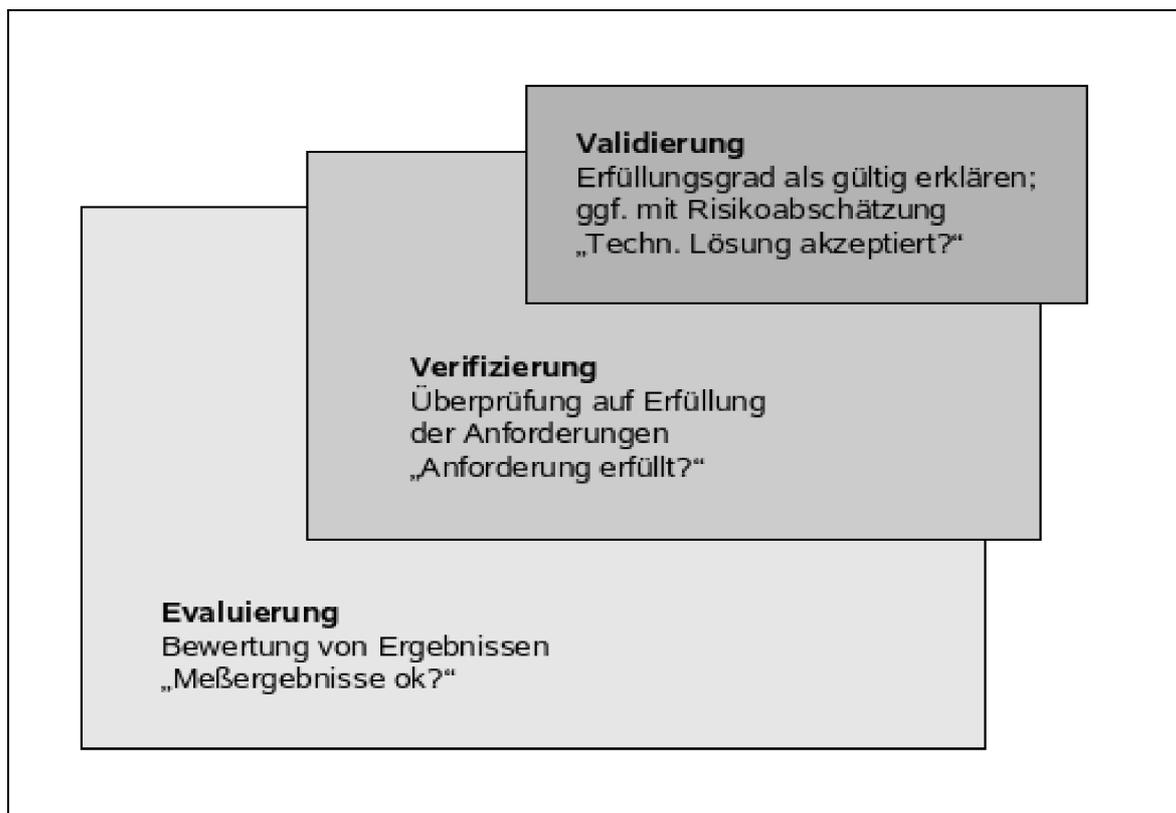


Abbildung 9: Die Begriffe Evaluierung, Verifizierung und Validierung

Ein Teil der Produkthanforderungen existiert heutzutage noch immer in Dokumentenform. Dies ist zum Teil auf den mangelnden Einsatz von Anforderungsmanagementsystemen zurückzuführen, aber auch auf die Anwendung unternehmensexterner Anforderungsspezifikationen (zum Beispiel: Gesetzesanforderungen). Ebenso liegen die Prüfvorschriften in Form von Dokumenten vor. Diese exakte Trennung zwischen Anforderungsdokumenten und Prüfvorschriften tritt in der Praxis jedoch nicht allzu häufig auf. Vielmehr finden sich in ein und demselben Dokument sowohl Anforderungen als auch Prüfmethode wieder. Im Rahmen dieser Arbeit soll im Falle, dass ein Dokument nur Anforderungen enthält,

von *Anforderungsspezifikation* und im Falle, dass nur Prüfmethode(n) enthalten sind, von *Prüfvorschrift* gesprochen werden. Ist beides in einem Dokument enthalten, so wird dies einfach als Spezifikation bezeichnet (Abbildung 10).

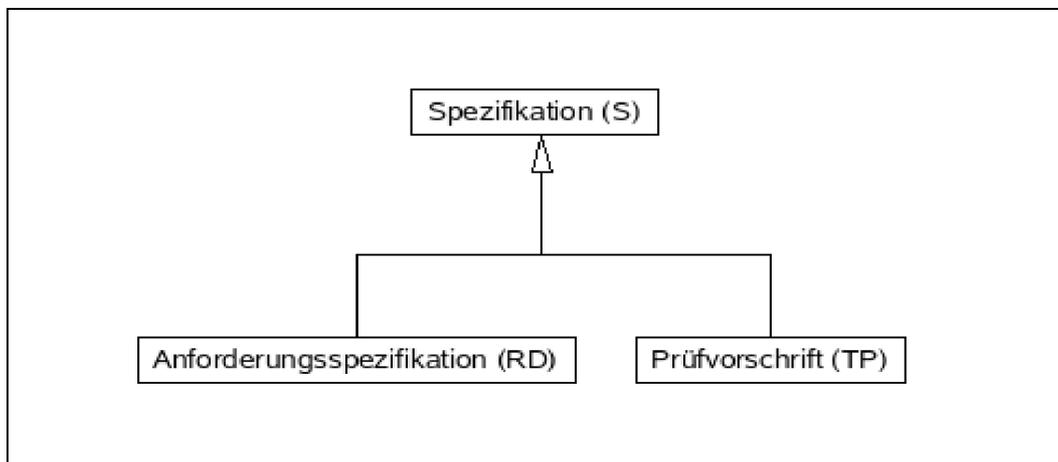


Abbildung 10: Theoretische Unterteilung der Spezifikationen

Nachdem die grundlegenden Begriffen definiert sind, gilt es zum einen bezüglich der Produkthanforderungen präziser zu werden und zum anderen eine Syntax für die Formulierung von Produkthanforderungen einzuführen. Gleichzeitig werden zur besseren Darstellung eigene graphische Symbole<sup>28</sup> eingeführt. Daneben werden auch Darstellungsweisen der Unified Modelling Language (UML)<sup>29</sup> herangezogen.

In Definition 8 wurden Produkthanforderungen in allgemeiner Form vorgestellt, wie sie auch häufig in der Praxis auftreten. Diese Form reicht jedoch noch nicht aus, um das in Kapitel 3.3 beschriebene Modell aufzubauen. Um die Anforderungen noch präziser fassen zu können, dient der Begriff der *Normalisierung*.

28 siehe Anhang

29 siehe auch [BRJ-99], [Oest-04], [Balz-01]

**Definition 11:** Normalisierung

Normalisierung ist die Zerlegung einer Produkthanforderung in deren semantische Bestandteile wie Produktelemente, Gewichtung, Eigenschaften, Merkmale und untergeordnete Produktelemente. Ergebnis der Normalisierung sind Produkthanforderungen in normalisierter Form.

Der Begriff Normalisierung wurde gewählt, um anzudeuten, dass die Anforderung in eine „Normalform“, das heißt in eine definierte Struktur gebracht wird. Der Begriff ist nicht zu verwechseln mit der Normalisierung im IT-Bereich, das heißt im Zusammenhang mit relationalen Datenbanken<sup>30</sup>.

**Definition 12:** Normalisierte Produkthanforderung

Eine normalisierte Produkthanforderung ( $R_n$ ) ist die einfachste semantische Form einer Produkthanforderung. Sie besteht genau aus drei semantischen Anteilen  $\{PE, I, P \vee F \vee pe\}$  und kommt in drei Ausprägungen vor: Die normalisierte Eigenschafts-, Merkmals- und Lösungsgebundene Produkthanforderung:

$R_{nX} \in \{ R_{nP}, R_{nF}, R_{npe} \}$  mit

$R_{nP} := PE \oplus I \oplus P$  (*Eigenschaftsanforderung*)

$R_{nF} := PE \oplus I \oplus F$  (*Merkmalsanforderung*)

$R_{npe} := PE \oplus I \oplus pe$  (*Lösungsanforderung*)

oder auch

$R_{nX} := PE \oplus I \oplus X$  mit  $X \in \{ P, F, pe \}$

Diese Definition bedarf einiger Anmerkung sowie zweier weiterer Definitionen (13 und 14), und es sei darauf hingewiesen, dass der Einfachheit halber nachfolgend die Kurzformen Eigenschaftsanforderung, Merkmalsanforderung und Lösungsanforderung verwendet werden.

<sup>30</sup> zum Beispiel [Saue-92]

Auffallend an der Schreibweise ist der Operator „ $\oplus$ “<sup>31</sup>. Er soll als semantischer Verknüpfungsoperator bezeichnet werden und verknüpft semantische Anteile einer Anforderung miteinander. Zu lesen ist er derart: „Eine Eigenschaftsanforderung ist per definitionem eine semantische Verknüpfung aus einem Produktelement, einer Gewichtung und einer Eigenschaft“.

Der Buchstabe „I“ steht für die Gewichtung der normalisierten Produkthanforderung. Damit sind definierte Modalverben gemäß DIN 820-2 gemeint (siehe Anhang). Um in der Praxis Missverständnisse zu vermeiden, sollte, wann immer möglich, die normalisierte Produkthanforderung mit positiver Gewichtung vorliegen. So wird empfohlen die Anforderung „Das Fahrzeug darf nicht mehr als 7 l Super-Benzin auf 100 km verbrauchen“ in die positive Form umzuformulieren: „Das Fahrzeug muss weniger als 7 l Superbenzin auf 100 km verbrauchen.“

Neben den Eigenschafts- und Merkmalsanforderungen tritt in der Praxis mit der Lösungsanforderungen eine weitere Art von Anforderungen auf. Es ist durchaus üblich, schon zu Beginn eines Projektes die Verwendung bereits existierender technischer Lösungen oder den Einsatz bestimmter (neuer) Technologien zu fordern. An Stelle von Eigenschaften und Merkmalen, die das Produkt erfüllen soll, werden Produktbestandteile in den Anforderungen angegeben und dadurch Funktionen der Produktbestandteile impliziert. Diese Art der Anforderungen soll als *lösungsgebundenen Produkthanforderung* (oder kurz: *Lösungsanforderung*) bezeichnet werden.

**Definition 13:** Normalisierte, lösungsgebundene Produkthanforderung

Eine lösungsgebundene Produkthanforderung schränkt die Lösungsvielfalt eines Produktelements durch die Verwendung bestimmter Lösungen für untergeordnete Produktelemente ein.

$$R_{\text{npe}} := \text{PE} \oplus \text{I} \oplus \text{pe} \quad (\text{Lösungsanforderung})$$

Das untergeordnete Produktelement (pe) bezieht sich immer auf das Produktelement (PE) und zwar im Sinne „ist-funktionaler-Bestandteil-von“. Dies gilt auch für alle nicht eingebauten Produktelemente wie zum Beispiel den Zündschlüssel oder den Dachgepäckträger. Beispiel für eine Lösungsanforderung: „Das Fahrzeug muss mit einer Klimaanlage ausgestattet sein“.

Bezüglich der Lösungsanforderung muss auf einen Spezialfall hingewiesen werden, der in der Praxis zur Vereinfachung während der Produktdefinition angewandt wird. Unternehmensexterne Produkthanforderungen, wie zum Beispiel Gesetzesan-

<sup>31</sup> Das Symbol „ $\oplus$ “ für den semantischen Verknüpfungsoperator wurde der Schaltalgebra entnommen (früher: EXOR), wird dort nicht mehr verwendet (da veraltet) und steht somit wieder zur Verfügung.

forderungen oder Anforderungen von privatwirtschaftlichen Institutionen (zum Beispiel: Euro NCAP<sup>32</sup>) sind meist in Dokumentenform verfasst. Die Benachrichtigung über Änderungen hören meist an den Unternehmensgrenzen auf, so dass nur schwer kontrollierbar ist, ob und wie die Informationen über Änderungen in die Produkthanforderungen einfließen. Aus diesem Grund werden die Merkmale oder die dazugehörigen Wertebereiche zum Teil nicht in die Produkthanforderungen aufgenommen, sondern auf die entsprechenden Vorschriften verwiesen. Hierzu soll eine implizierende Form der Merkmalsanforderung definiert werden.

**Definition 14:** Normalisierte, referenzierende Merkmalsanforderung

Eine normalisierte, referenzierende Merkmalsanforderung ist die implizierende Form der normalisierten Merkmalsanforderung. An Stelle der expliziten Angabe des Merkmals wird auf eine Anforderungsspezifikation (RD) verwiesen.

$$R_{\text{nrD}} := \text{PE} \oplus \text{I} \oplus \text{F}(\text{RD}) \quad (\text{referenzierende Merkmalsanforderung})$$

Die Arbeit mit referenzierenden Merkmalsanforderungen birgt Vor- und Nachteile in sich. Für die Verwendung von referenzierenden Merkmalsanforderungen spricht die Übersichtlichkeit in umfangreichen Produktdefinitionen. Von Nachteil ist, dass die informationstechnische Verarbeitung nicht möglich ist, da die Inhalte von Anforderungsspezifikationen nicht strukturiert vorliegen. Da die Merkmale nicht explizit aufgezeigt werden, besteht die Gefahr zu „glauben“, was in der Anforderungsspezifikation steht. Von Nachteil ist auch, dass bei der Prüfung von referenzierenden Merkmalsanforderungen kaum Messungen durchgeführt werden können. Wird eine derartige Anforderung nicht weiter heruntergebrochen, kann bei der Verifizierung und Validierung nur eine Aussage über den Erfüllungsgrad der Anforderung angegeben werden (Idealfall: „die Anforderungsspezifikation wurde vollständig erfüllt“). Die Anforderungsarten einschließlich ihrer Messbarkeit sind als Übersicht in Abbildung 11 dargestellt.

Nachdem nun alle drei Anforderungsarten und der Spezialfall der referenzierenden Merkmalsanforderung definiert sind, soll noch einmal auf die Gewichtung eingegangen werden. Gewichtungen sind von Bedeutung, weil sie den Entscheidungsprozess, ob eine Produkthanforderung technisch umgesetzt wird oder nicht, maßgeblich bestimmen. In dieser Arbeit sollen vier Produkthanforderungstypen vorgeschlagen werden. In Tabelle 2 sind diese für die vier Produkthanforderungsarten aufgeführt.

<sup>32</sup> European New Car Assessment Program, <http://www.euroncap.com/index.php>

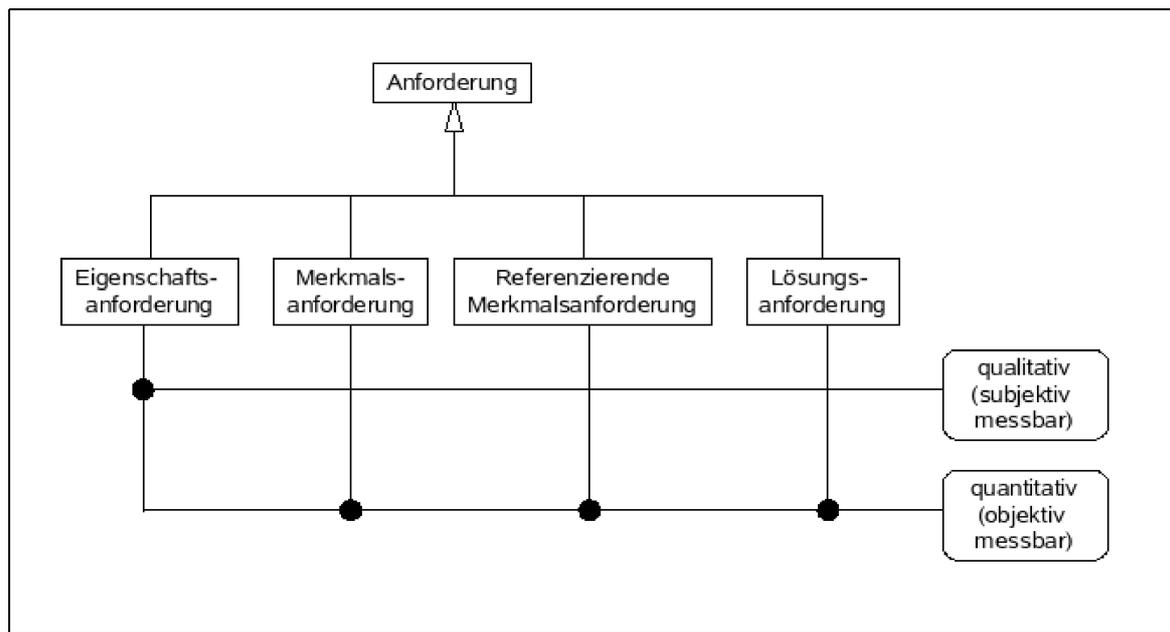


Abbildung 11: Anforderungsarten und Messbarkeit

	<b>Produktanforderungsart</b>			
<b>Produktanforderungstyp</b>	<b>Eigenschaftsanforderung</b>	<b>Merkmalsanforderung</b>	<b>Lösungsanforderung</b>	<b>referenzierende Merkmalsanforderung</b>
<b>Muss-Produktanforderung</b>	Die Produktanforderung ist verbindlich umzusetzen	Das Prüfergebnis muss in dem vorgegebenen Intervall oder der vorgegebenen Menge liegen	Die Produktanforderung ist verbindlich und mittels der vorgegebenen Technologie oder existierender technischer Lösungen umzusetzen	Die referenzierte Spezifikation ist zwingend anzuwenden
<b>Sollte-Produktanforderung</b>	Die Produktanforderung ist umzusetzen, sofern keine davon abhängige Muss-Produktanforderung benachteiligt wird	Es ist anzustreben, dass das Prüfergebnis im vorgegebenen Intervall oder der vorgegebenen Menge liegt	Der vorgeschlagenen Technologie oder existierende technische Lösung ist der Vorzug zu geben, sofern abhängige Muss-Produktanforderungen nicht benachteiligt werden	Die referenzierte Spezifikation ist zu beachten
<b>Darf-Produktanforderung</b>	Die Produktanforderung ist umzusetzen, sofern verbleibende Ressourcen es erlauben und Muss- oder Soll-Produktanforderungen nicht benachteiligt werden	nicht anwendbar	nicht anwendbar	nicht anwendbar
<b>Kann-Produktanforderung</b>	Die Produktanforderung ist für eine Umsetzung in Betracht zu ziehen, allerdings dürfen hierbei alle anderen, höher gewichteten Produktanforderungen nicht benachteiligt werden	nicht anwendbar	nicht anwendbar	nicht anwendbar

*Tabelle 2: Muss-, Soll-, Darf- und Kann-Produktanforderungen*

Die Unterscheidung des Produkthanforderungstyps folgt der DIN 820-2 Anhang G<sup>33</sup>. In dieser Norm sind die Verben, deren Synonyme, die Verneinung sowie die englischen und französischen Übersetzungen definiert.

Typische Vertreter von Muss-Produkthanforderungen sind Produkthanforderungen von Seiten des Gesetzgebers. Werden diese nicht erfüllt, ist die Typabnahme gefährdet, und das Fahrzeug darf nicht in Serienproduktion gefertigt werden.

Demgegenüber sind alle anderen, speziell unternehmensinternen Produkthanforderungen weniger restriktiv. Bei deren Einstufung spielen unternehmensstrategische und -politische Interessen eine wesentliche Rolle. Auch sind die Produkthanforderungen weniger restriktiv als gesetzliche Produkthanforderungen. So wird zum Beispiel eine Hinterachse, für die ein Betrag von Euro X Produktkosten als oberes Limit in Form einer Muss-Produkthanforderung definiert wurde, am Ende der Entwicklung auch dann noch in Serie gehen, wenn das Limit um den (vertretbaren) Betrag  $\Delta x$  überschritten wurde, da sonst die Serienproduktion gefährdet ist. Die Gewichtung unterliegt einer „gewissen“ Unschärfe, und die Grenzen zwischen den einzelnen Einstufungen sind somit fließend. Die Darf- und Kann-Produkthanforderung wurde in Anlehnung an die DIN 820-2 in die Tabelle mit aufgenommen, jedoch besitzen diese beiden Anforderungstypen eher theoretischen Charakter. In der Praxis versucht man sich auf Muss- und Soll-Produkthanforderungen zu beschränken.

Eine Produkthanforderung, welche nur Eigenschaften enthält, lässt sich somit auch in der Form  $R_p := \sum PE \oplus I \oplus \sum P$  beschreiben bzw. in der Unified Modelling Language darstellen (Abbildung 12, nicht normalisiert). Ein Beispiel hierzu ist: „Der Handbremshebel, der Schalthebel und der Türinnengriff müssen sich gut anfühlen und sportlich aussehen“.

---

33 siehe Anhang

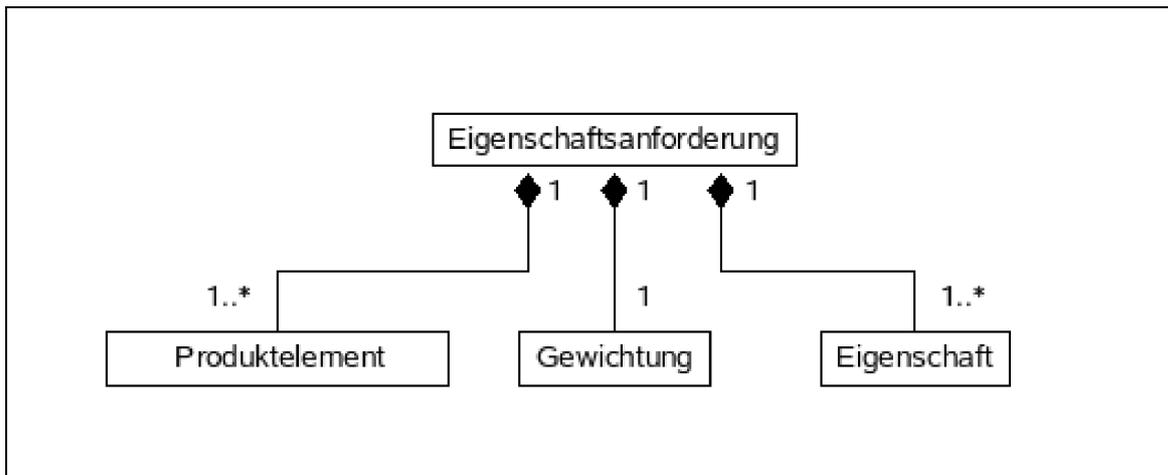


Abbildung 12: Komposition einer Eigenschaftsanforderung

Analog dazu lassen sich Produkthanforderungen, welche nur Merkmale enthalten, in der Form  $R_F := \Sigma PE \oplus I \oplus \Sigma F$  und Produkthanforderungen, welche nur vorgegebene technische Lösungen enthalten, in der Form  $R_{pe} := \Sigma PE \oplus I \oplus \Sigma pe$  angeben. Die beiden Produkthanforderungen lassen sich entsprechend Abbildung 12 darstellen.

Zusammenfassend lässt sich jede Produkthanforderung in vier Anteile aufspalten. Ein Eigenschaftsanteil, einen Merkmalsanteil, einen referenzierenden Merkmalsanteil sowie einen lösungsgebundenen Anteil:

**Definition 15:** Produkthanforderung in allgemeiner Form

$$R := \Sigma R_{nP} \oplus \Sigma R_{nF} \oplus \Sigma R_{nRD} \oplus \Sigma R_{nep}$$

Zwei Anmerkungen zur Definition 15: Aus ihr geht nicht hervor, auf welchem Abstraktionsniveau, bezogen auf die Produktelemente, sich die einzelnen normalisierten Produkthanforderungen befinden. Dies bedeutet, dass sowohl normalisierte Produkthanforderungen auf Fahrzeugebene als auch auf untergeordneten Ebenen (zum Beispiel: System, Komponente) enthalten sein können.

Liegen alle Produkthanforderungen in normalisierter Form vor, so kann die Summe aller Produkthanforderungen als Lastenheft bezeichnet werden.

Die Produkthanforderung „Der Roadster darf maximal einen Verbrauch von 6,4 l/100km aufweisen“ genügt zwar formal der Definition 12, wird jedoch in der Realität so nicht auftreten, da die Anforderung keine Aussage darüber liefert, unter

welchen Bedingungen dieser Verbrauch einzuhalten ist. Eine Erweiterung um sogenannte *Randbedingungen* präzisiert die Anforderung: „Der Roadster darf im innerstädtischen Verkehr maximal einen Verbrauch von 6,4 l/100km aufweisen“.

### **Definition 16:** Randbedingung

Eine Randbedingung (C) ist eine Einschränkung der Eigenschaft, des Merkmals oder der existierenden Lösung innerhalb einer Produktanforderungen.

Der Begriff Randbedingung wird in der vorliegenden Arbeit mit *Constraint* ins Englische übersetzt. Auch JÖRG und GEBAUER verwenden in ihren Veröffentlichungen den Begriff *Constraint*. In [Joer-05, Seite 97] findet man ihn wie folgt beschrieben:

*„Der Begriff Constraint kommt aus dem Englischen und kann mit Zwang, Bedingung, Einschränkung oder Zwangsbedingung übersetzt werden. Im Bereich der Informatik und Wissensverarbeitung versteht man unter Constraint die mathematische Beschreibung von Beziehungen zwischen Variablen. Constraints eignen sich sehr gut zur Unterstützung des Lösungsfindungsprozesses, da durch sie Randbedingungen vorgegeben werden können und somit der Lösungsbereich eingeschränkt wird, ohne die eigentliche Lösung explizit zu definieren.“*

Randbedingungen beziehen sich immer auf Eigenschaften, Merkmale oder existierende Lösungen, und zwar stets im Kontext der Produktanforderung. Des Weiteren tragen Randbedingungen immer zur Präzisierung von Produktanforderung bei. So ist zum Beispiel die Anforderung „Das Fahrzeug soll nach maximal 36 m zum Stehen kommen“ relativ unvollständig, da keine Aussage über die Anfangsbedingungen getroffen wurden. Dagegen wäre die Anforderung mit der Merkmalseinschränkung „Das Fahrzeug soll aus einer Geschwindigkeit von 100 km/h nach 36 m zum Stehen kommen“ schon wesentlich genauer.

Einschränkungen der Eigenschaften treten in einem Fahrzeugprojekt im Vergleich zu Merkmals- oder Produktelementeinschränkungen relativ selten auf. Ein Beispiel für eine solche Einschränkung lautet: „Das Fahrwerk soll für den europäischen Markt sportlich ausgelegt sein.“ Die Einschränkung besteht hier in der Einengung der Verkaufsregion, das heißt auf den europäischen Markt.

Randbedingungen finden sich oft auch in Spezifikationen (zum Beispiel: gesetzlichen Vorschriften). In welchem Fall eine Randbedingung explizit in die Produktanforderung aufgenommen oder besser in der Spezifikation belassen wird, lässt sich

nicht grundsätzlich beantworten. Ersteres ist sicher dann empfehlenswert, wenn sie zu IT-gestützten Plausibilitäts- oder Integritätstests herangezogen wird. Nachteil dieser Redundanz ist, dass der simultane Abgleich zwischen Produkthanforderung und Spezifikation nicht sichergestellt werden kann.

Ein Beispiel für die Redundanz von Randbedingungen ist: „Die Lenksäule darf bei einem Frontalaufprall bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h und 0 % Offset einen maximalen dynamischen rückwärtigen Versatz von 127 mm nicht überschreiten“. Diese Produkthanforderung wurde sinngemäß der „ECE R-12 Steering Impact“ entnommen und beinhaltet die Randbedingungen hinsichtlich Geschwindigkeit und Offset. Einem Experten genügt vermutlich die Angabe über die maximal 127 mm Versatz, da er die gesetzliche Vorschrift und die Randbedingungen kennt<sup>34</sup>.

Betrachtet man solche Merkmalsanforderung genauer, so wird man feststellen, dass Randbedingungen in zwei Kategorien aufgeteilt werden können: Da sind zum einen die Randbedingungen, die Umgebungsbedingungen (zum Beispiel: Straßenbelag: nasser Asphalt) oder das Verhalten des Produktelements (zum Beispiel: Bewegung mit 50 km/h) beschreiben. Zum anderen gibt es Randbedingungen, die Konfigurationen des Produktelementes definieren, sogenannte *Verwendungseinschränkungen*. Ein Beispiel für eine Randbedingung in einer Verwendungseinschränkung könnte lauten: „Das Fahrzeug soll eine Klimaanlage aufnehmen, jedoch nur in Verbindung mit dem 1,8 l ECOTEC<sup>35</sup>-Motor“.

Randbedingungen unterscheiden sich von sogenannten *Abhängigkeiten*<sup>36</sup>. Dies soll an einem einfachen Beispiel mit zwei Anforderungen veranschaulicht werden: „Das Fahrzeug soll bei einer Gesamtmasse von 1350 kg in 7,5 s von 0 auf 100 km/h beschleunigen“ und „Das Fahrzeug soll im innerstädtischen Verkehr maximal 6,3 l/100km Super-Benzin verbrauchen“. Beide Anforderungen hängen voneinander ab und schränken offensichtlich den Lösungsraum ein (zum Beispiel bei der Auswahl des Motors). Im ersten Fall ist die Angabe der Gesamtmasse die Randbedingung hinsichtlich des Beschleunigungsverhaltens des Fahrzeugs. Im zweiten Fall schränkt das Betriebsprofil „innerstädtischer Verkehr“ (ebenfalls eine Randbedingung) den Benzinverbrauch ein. Randbedingungen beziehen sich immer auf das Merkmal (oder in manchen Fällen auch auf die Eigenschaft) treffen jedoch keine Aussage über die Wechselwirkung der Merkmale (oder Eigenschaften) untereinander. Die gegenseitige Beeinflussung der Merkmale (oder Eigenschaften) von Anforderungen gilt es getrennt zu betrachten. Die gegenseitige Beeinflussung von Merkmalen (oder Eigenschaften) ist objektiv vorhanden, führt im Gegensatz zu Randbedingungen aber nicht zwingend zu Lösungseinschränkungen. Dies wäre im Beispiel der Fall,

---

34 Eventl. würde sogar die Produkthanforderung „Die Lenksäule muss bei einem Frontalaufprall die ECE R-12 erfüllen“ dem Experten genügen.

35 eingetragenes Warenzeichen

36 wird in Kapitel 3.3 definiert

wenn ein Verbrauch von 15 l/100 km gefordert wäre, denn bei jedem größeren PKW-Hersteller finden sich heutzutage Motoren im Portfolio, die ohne Schwierigkeiten beide Anforderungen erfüllen.

Zwischen den Anforderungselementen besteht genau genommen eine Kausalkette. Die Randbedingungen beziehen sich immer auf die Eigenschaften, Merkmale oder Lösungen. Diese wiederum beziehen sich auf das Produktelement innerhalb der Anforderung. Alles zusammen verkörpert letztendlich die Produkthanforderung. Ein Prüfergebnis besitzt aber nur dann die Berechtigung zur Validierung, wenn bei der Verifizierung auch alle angegebenen Randbedingungen der Produkthanforderung berücksichtigt wurden.

In diesem Kapitel wurden die grundlegenden Begriffe für das Anforderungsmodell in Kapitel 3.3 gelegt. Dazu gehörten das Produkt sowie der dazugehörige Prozess der Produktentwicklung, die Unterscheidung zwischen Eigenschaft, Merkmal und Funktion, das Produktelement, die Produkthanforderung allgemein sowie deren drei bzw. vier normalisierten Formen. Darüber hinaus wurde der Begriff Spezifikation erfasst und dessen Ausprägungen, das heißt die Anforderungsspezifikation und die Prüfvorschrift. Auch der Begriff Randbedingung wurde näher erläutert. Zusätzlich wurde im Rahmen der Normalisierung eine Syntax und eine Struktur für Produkthanforderungen vorgeschlagen.

In Kapitel 3.3 fallen weitere Begriffe an, die allerdings erst im Kontext des Anforderungsmodells definiert werden können.

## 3.2 Exkurs Natur

### 3.2.1 Einleitung

Auf der Suche nach Problemlösungen werden in den Ingenieurdisziplinen gerne Analogien aus der Natur herangezogen. Den zugehörigen Wissenschaftszweig nennt man *Bionik*. Der Term setzt sich aus Biologie und Technik zusammen und bringt damit zum Ausdruck, dass man für technische Anwendungen Prinzipien verwendet, die aus der Biologie abgeleitet sind. Allgemein beschäftigt sich die Bionik mit der Entschlüsselung von "Erfindungen der belebten Natur" und ihre innovative Umsetzung in der Technik. Die Bionik ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, in dem zum Beispiel Biologen, Ingenieure, Techniker und Designer zusammenarbeiten.<sup>37</sup>

---

<sup>37</sup> siehe auch: [Nach-98]

So dienen zum Beispiel mit Riblet-Folien beklebte Flugzeugtragflächen zur Minderung des Reibungswiderstandes und reduzieren somit den Treibstoffverbrauch. Das Prinzip haben die Bioniker der Haifischhaut nachempfunden. Ein weiteres klassisches Beispiel ist der Klettverschluss, dessen Prinzip auf Widerhaken basiert ähnlich den Widerhaken bei Klettenfrüchten<sup>38</sup>.

Interessanterweise sind es fast ausschließlich Eigenschaften und Merkmale von Lebewesen, die von den Ingenieurwissenschaften aufgegriffen und in technische Produkteigenschaften und Merkmale umgesetzt werden. Im Vergleich hierzu werden Prozesse eher selten in der Bionik untersucht.

Bevor im anschließenden Kapitel 3.3 ein Modell als Grundlage für ein integratives Anforderungsmanagement erstellt wird, soll ein Exkurs in die Biologie unternommen werden. Die drei Themengebiete, die hierzu grob beleuchtet werden, sind: Der Informationsträger für die Entwicklung eines Individuums, die Entstehung eines Individuums sowie die Entwicklung von Individuen über Generationen hinweg<sup>39</sup>.

Hinweis:

*Die folgenden Überlegungen in Kapitel 3.2 dienen ausschließlich dazu, die Produktentwicklung aus einer neuen „natürlichen“ Perspektive zu betrachten. Die Gegenüberstellung von biologischer Entwicklung und technischer Produktentwicklung kann nur als Anregung für Gedankenmodelle genutzt werden. Es wäre vermessen, direkte Analogien von natürlichen Prozessen mit technischen Prozessen erstellen zu wollen, denn die Strukturen und Vorgänge schon in der kleinsten Amöbe sind bei weitem komplexer als jemals von Menschen entwickelten Produkte.*

### 3.2.2 Bestandteile und Prozesse in der Natur

Zuerst gilt es, biologische Bestandteile, die von Interesse sein könnten, näher zu betrachten (siehe auch [CaRe-03], [Fisc-02], [Fisc-03], [Webe-02]).

Beim Aufbau von biologischen Organismen sind vier Basen von grundlegender Bedeutung: *Adenin* (A), *Thymin* (T), *Cytosin* (C) und *Guanin* (G). Jede dieser Basen ergibt in Verbindung mit einer Phosphatgruppe und einem Zucker (Desoxiribose) jeweils ein *Nukleotid*. Den vier Bausteinen sind jeweils die Phosphatgruppen und die Desoxiribose gemeinsam, deswegen unterscheidet man die Nukleotide der Einfachheit halber nur durch Angabe der Base. Diese vier Bausteine lassen sich über Wasserstoffbrücken und hydrophobe Bindungen zu Riesenmolekülen aneinander reihen. Diese Kette wird als sogenannte *Primärstruktur* bezeichnet.

<sup>38</sup> Kletten sind Pflanzen.

<sup>39</sup> siehe auch [MaOv-03] und [MaBa-05]

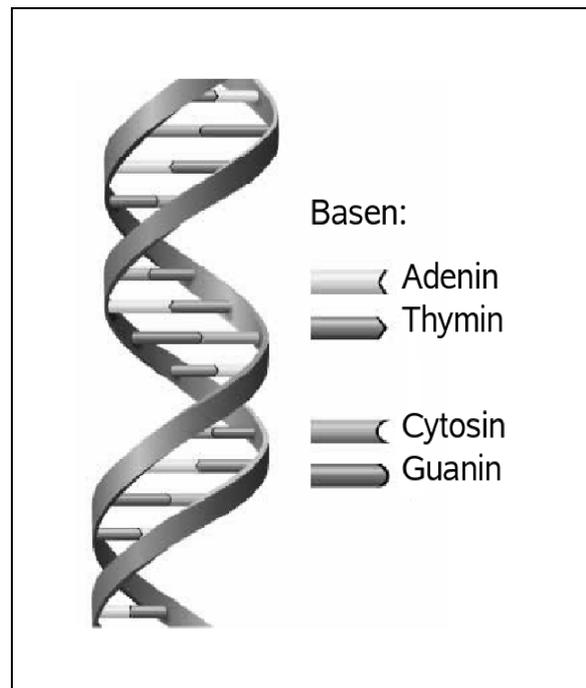


Abbildung 13: Natürliche DNA (Ausschnitt)

Jeweils zwei der Basen verhalten sich komplementär zueinander: Adenin und Thymin sowie Cytosin und Guanin. An jeden Nukleotidbaustein der Primärstruktur lagert sich über eine Wasserstoffbrücke der jeweils komplementäre Nukleotidbaustein an. Die daraus entstandene Struktur wird als *Sekundärstruktur* bezeichnet, deren Charakteristikum die Anordnung in Form einer Doppelhelix ist. Dieses Riesenmolekül ist allgemein als *Desoxyribonukleinsäure (DNS)* bzw. im Englischen unter der Bezeichnung *Deoxyribonucleic Acid (DNA)* bekannt (Abbildung 13).

Die DNA bildet noch eine Tertiär- und eine Quartärstruktur aus. Letztere lassen sich leicht anfärben und mit leistungsfähigen Lichtmikroskopen sichtbar machen.<sup>40</sup> Daher nennt man sie auch *Chromosome*.

Es gibt zwei weitere wichtige Bestandteile: Aminosäuren und Proteine. *Aminosäuren* sind organische Verbindungen. Sie bestehen aus einer Carboxylgruppe und einer Aminogruppe, wobei sich die einzelnen Aminosäuren durch einen definierten Aminosäurerest in einer Seitenkette unterscheiden. Zu Ketten aneinandergereihte Aminosäuren bilden *Proteine*<sup>41</sup>, die Grundbausteine der biologischen Zellen. Die Aufgaben der Proteine im Organismus sind vielfältig. Als Beispiele für Proteine seien genannt:

<sup>40</sup> griech.: chromos = Farbe + soma = Körper; also anfärbares Körperchen

<sup>41</sup> Synonym für Protein ist Eiweiß.

- Strukturproteine bestimmen den gesamten Körperaufbau und die Beschaffenheit von Geweben, beispielsweise der Haarstruktur
- Enzyme ermöglichen und beschleunigen chemische Reaktionen. Hormone, steuern Vorgänge im Körper. Transportproteine übernehmen den Transport von Substanzen, die für den Körper wichtig sind, wie zum Beispiel Hämoglobin, das im Blut für den Sauerstofftransport zuständig ist, oder Transferrin, das Eisen im Blut befördert

Interessant ist der Zusammenhang zwischen der DNA und den Proteinen. Abschnitte auf der DNA, sogenannte *Gene*<sup>42</sup>, beinhalten die Information, die zur Bildung von Proteinen führt. Dazu wird ein Abschnitt des Doppelstrangs wie ein Reißverschluss aufgetrennt und eine Hälfte komplementär kopiert. Die komplementären Basen sind hierbei Adenin, Guanin, Cytosin. Das Komplementär zu Thymin ist eine Base mit Namen Uracil (U). Der Vorgang wird als Transskription bezeichnet, findet innerhalb des Zellkerns statt<sup>43</sup>, und die dabei erzeugte Basenkette wird als Boten- oder Messenger-RNA<sup>44</sup> (*mRNA*) bezeichnet. Die mRNA wandert aus dem Zellkern in die Ribosomen. Das sind Zellbestandteile, in denen über den Prozess der Translation die Proteinbiosynthese stattfindet. Aus jeweils drei Basen, die ein sogenanntes Codon bilden, das gleichzeitig die kleinste Informationseinheit darstellt, werden die entsprechenden Aminosäuren synthetisiert. Die so erzeugten Aminosäureketten sind Proteine, die Grundbausteine der Zellen. Trotz der  $4^3 = 64$  möglichen Codons gibt es auf Grund von Mehrfachbelegungen nur 20 verschiedene Aminosäuren. Der soeben beschriebene Prozess ist in Abbildung 14 dargestellt.

Die nächstgrößere Einheit in einem Organismus bilden *Zellen*. Eine Zelle ist die grundlegende, strukturelle und funktionelle Einheit aller Organismen (Lebewesen). Sie bestehen aus den sogenannten Organellen, das heißt verschiedenen Zellkörperchen mit spezialisierten Funktionen. Eine Art von Organellen wurde schon vorgestellt: die Ribosomen, die für die Proteinsynthese zuständig sind. Daneben gibt es zum Beispiel das sogenannte Endoplasmatische Retikulum (ER), das vielfältige Stoffwechselfvorgänge und die Bildung von Membranen ermöglicht. Oder auch der Golgi-Apparat, den man sich als Fertigungs-, Lager-, Sortier- und Versandzentrale vorstellen kann. Hier werden Produkte des Endoplasmatischen Retikulums abgewandelt, gespeichert und dann zu anderen Bestimmungsorten weiterbefördert. Daneben gibt es noch Vakuolen, Lysosomen und einige mehr [CaRe-03, Seite 129 f.]

---

42 Ein Gen ist ein Abschnitt der DNA der zur Herstellung eines RNA Moleküls benötigt wird [CaRe-03, Seite 381].

43 Im Falle von eukaryotischen Zellen, das heißt Zellen mit einem Zellkern

44 RNA = Ribonucleic Acid

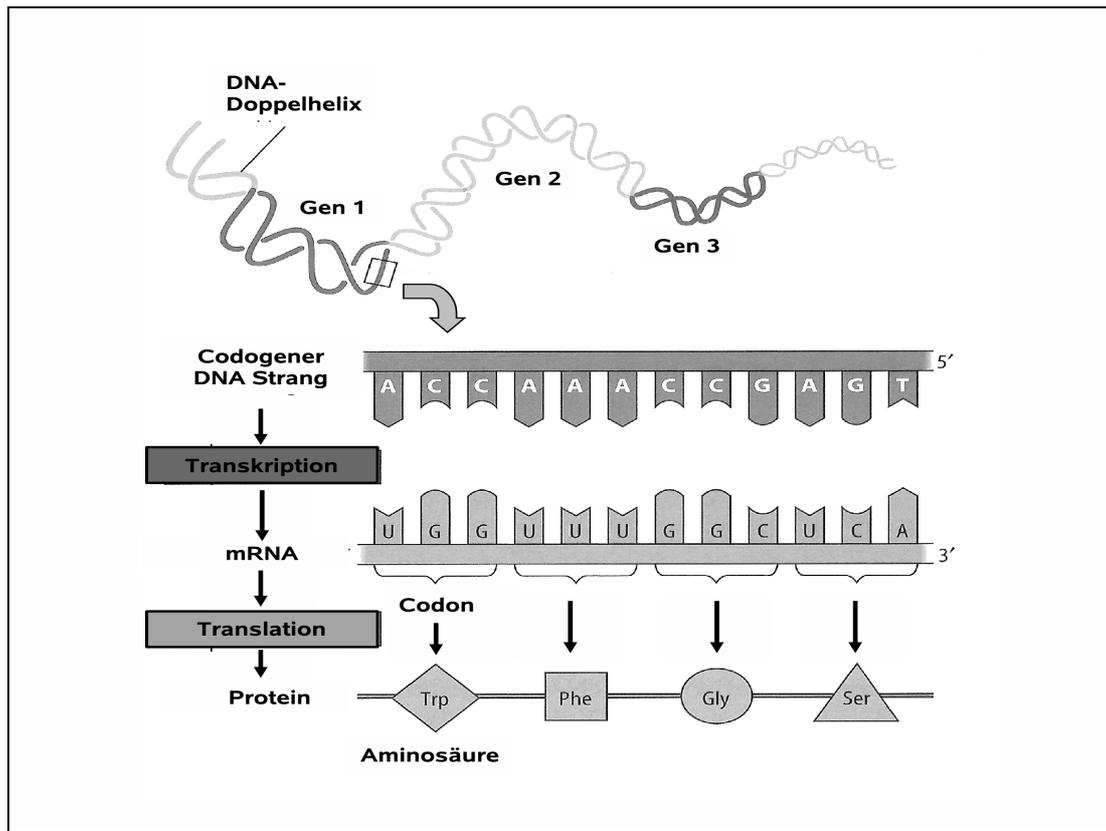


Abbildung 14: Von der DNA zum Protein

In der Hierarchie der biologischen Organismen ist die Zelle die einfachste lebensfähige Materieansammlung. Vielfältige Lebensformen sind tatsächlich Einzeller. Tiere, Pflanzen und Pilze bestehen dagegen aus vielen Zellen. Ihr Körper ist eine Lebensgemeinschaft zahlreicher unterschiedlich spezialisierter Zellen, die alleine meist nicht lange überleben könnten. Zellen sind grundlegende Struktur- und Funktionselemente, auch wenn diese sich auf höheren Organisationsebenen zu Geweben (zum Beispiel: Muskelgewebe) und Organen (zum Beispiel: Nervensystem, Lunge) zusammenschließen.

Um eine Vorstellung zu erhalten in welcher Größenordnung die bisher beschriebenen Bestandteile in einem höheren Lebewesen vorkommen, hier als Beispiel der menschliche Organismus (Tabelle 3):

Bestandteil	Anzahl
Basenpaare der DNA	~ 3,2 * 10 <sup>9</sup> pro Zelle (haploid)
Gene	~ 65.000 - 70.000 pro Zelle
Chromosome	23 pro Samen-/Eizelle (haploid) 46 pro Körperzelle (diploid)
Zellen	~ 10 * 10 <sup>12</sup> bis 100 * 10 <sup>12</sup> pro Mensch, je nach Körpergewicht

Tabelle 3: Mengenbetrachtung – Organismus Mensch

Soweit in groben Zügen zu den Bestandteilen eines höheren biologischen Organismus. Als nächstes soll die Entwicklung eines solchen Organismus betrachtet werden<sup>45</sup>. Dieser Prozess wird von den Biologen als *Ontogenese* oder *Individualentwicklung* bezeichnet. Im Laufe der Individualentwicklung der meisten vielzelligen Organismen gehen aus einer einzelnen befruchteten Eizelle viele verschiedene Zelltypen mit unterschiedlicher Struktur und entsprechender Funktion hervor. Bei der Entstehung eines Lebewesens wirken drei miteinander in Beziehung stehende und sich zeitlich überlappende Prozesse zusammen:

- Zellteilung
- Differenzierung
- Morphogenese

Die *Zellteilung* ist ein mehrstufiger Prozess (siehe auch [CaRe-03, Seite 254 f.] ), bei dem die DNA verdoppelt wird, und sich die Zelle anschließend teilt, dass so am Ende zwei Zellen mit gleichen Chromosomensätzen vorliegen. Die Zellteilung dient der *Vermehrung*, dem *Wachstum* und der *Regeneration*.

Wenn sich ein Einzeller wie Amöbe teilt und dadurch zwei Exemplare entstehen, pflanzt sich ein ganzes Lebewesen durch die Verdopplung einer Zelle fort. Höhere Organismen, wie zum Beispiel Säugetiere, entwickeln sich durch wiederholte Zellteilung. So entsteht aus einer einzigen befruchteten Zelle am Ende ein vollständiger Organismus. Nachdem ein Organismus ausgewachsen ist, sorgt die Zellteilung weiterhin für Erneuerung, Wundheilung und Regeneration. Sie sorgt für den Ersatz von Zellen, die durch normale Abnutzung oder äußere Einwirkungen verloren gehen (Beispiel: Blutbildung im Knochenmark).

45 hier: hauptsächlich vielzellige, tierische Lebewesen

Die *Differenzierung* der Zellen schlägt sich in ihrer Struktur und Funktion wieder. Die Unterschiede zwischen den Zellen eines vielzelligen Organismus kommen fast ausschließlich durch eine unterschiedliche oder differentielle Genexpression zustande und nicht etwa durch abweichende Genome<sup>46</sup> der Zellen. Die Unterschiede entstehen während der Entwicklung auf Grund regulatorischer Mechanismen, die bestimmte Gene an- und abschalten.

Die Entwicklung der Form und der Organisation eines Körpers wird als *Morphogenese* bezeichnet. Zur Gestaltbildung tragen bei die

- Anzahl der Zellen auf Grund von Zellteilung
- Art der Zellen auf Grund von Differenzierung
- Größe der Zellen auf Grund von Zellausdehnung oder -streckung
- Position der Zellen auf Grund von Zellbewegungen<sup>47</sup>

An dieser Stelle sei auch auf den Begriff Wachstum hingewiesen, der nicht selten fälschlicherweise mit dem Begriff der Ontogenese gleichgesetzt wird. Als Wachstum bezeichnet man den irreversiblen Zuwachs an Masse, der sich aus Zellteilung und Zellstreckung ergibt [CaRe-03, Seite 872]. Dieser Vorgang ist folglich nur ein Bestandteil der Ontogenese.

Die *transkriptionelle Regulation*, das heißt das An- und Abschalten spezieller Gene, ist die Grundlage für die Unterschiede zwischen Zellen. Durch zwei Arten „erfährt“ eine Zelle, welche Gene zu einem bestimmten Zeitpunkt der Zellentstehung verwendet (exprimiert) werden müssen. Zum einen über *cytoplasmatische Determinanten*, das heißt mütterliche Substanzen der befruchteten Eizelle, und zum anderen über die sogenannte *Induktion* (siehe auch [CaRe-03, Seite 483]). Die Umgebung einer Zelle erlangt mit steigender Zahl embryonaler Zellen zunehmend an Bedeutung. Am bedeutendsten sind die Signale, die von anderen embryonalen Zellen in unmittelbarer Nähe auf eine solche Zelle auftreffen. Die Signalübertragung geschieht über Moleküle. Die Signalmoleküle bewirken in einem als Induktion bezeichneten Prozess Veränderungen der Zielzellen in ihrer Umgebung. Somit sind es Wechselwirkungen zwischen den embryonalen Zellen, die schließlich die Differenzierung der Zellen auslösen, welche einen neuen Organismus aufbauen.

Laut CAMPBELL und REECE [CaRe-03, Seite 491] entstanden aus wissenschaftlichen Untersuchungen eine Reihe wichtiger Konzepte, die für die Entwicklung vieler Tiere gelten. Zwei davon seien hier aufgeführt:

---

<sup>46</sup> Genom = Gesamtheit der Gene eines Organismus (hier: Zelle)

<sup>47</sup> nur bei Tieren

- Eine Reihe hintereinander geschalteter Induktionen sind die Triebfeder für die Organentwicklung während der Embryonalentwicklung
- Die Reaktion der induzierten Zelle besteht häufig in einer Aktivierung (oder Inaktivierung) von Genen – also einer Transkriptionskontrolle –, die wiederum das für einen bestimmten Typ differenzierter Zellen charakteristische Muster der Genaktivität festlegt

Das dritte Themengebiet ist die *Phylogenese* (stammesgeschichtliche Entwicklung, Evolution). Die Phylogenese ist die Evolutionsgeschichte einer Art oder einer Gruppe verwandter Arten [CaRe-03, Seite 1529]. Sie ist ein Ansatz zur naturwissenschaftlichen Erklärung für die Entstehung und Veränderung der Lebewesen im Laufe der Erdgeschichte.

Der Begriff *Art* entstammt der Systematik der Biologie, die unter anderem versucht mittels hierarchischer Klassifizierung (*Taxonomie*) die biologische Vielfalt im evolutionären Kontext aufzuklären. Die Ordnungsklasse „Art“ steht auf der untersten Ebene dieser hierarchischen Klassifizierung. Die Arten repräsentieren die in Gruppen zusammengefassten, derzeit existierenden Lebewesen. Übergeordnete Klassifizierungen sind Gattung, Familie, Ordnung, Klasse, Stamm, Reich und Domäne. Charles Darwin, der Entwickler der Evolutionstheorie, erkannte die Einheitlichkeit aller Lebensformen, indem er sie allesamt von einem unbekanntem gemeinsamen Vorfahren herleitete, der in der Vergangenheit gelebt hat. Aus darwinistischer Sicht ähnelt die Geschichte des Lebens einem Baum, dessen Stamm zahlreiche Äste bildet, die sich immer weiter verzweigen bis hin zu den Spitzen der jüngsten Triebe, welche die gegenwärtige Mannigfaltigkeit an Lebewesen symbolisieren.

Die Individuen einer Tier- oder Pflanzenart gleichen einander nicht vollkommen. Sie weisen in ihren Eigenschaften eine genetische Variabilität auf. Es gibt mehrere Ursachen für die Variabilität, wovon drei hervorgehoben werden sollen: Rekombination, Mutation und Selektion.

Unter der genetischen *Rekombination* versteht man die bei der geschlechtlichen Fortpflanzung auftretende, zufällige Neukombination von DNA-Sequenzen (Allelen<sup>48</sup>). Der Stückaustausch zwischen zwei homologen Chromosomen<sup>49</sup> ist unter anderem die Ursache für die schnellere Variation der Lebewesen, denn durch die Neukombination des genetischen Materials können neue, bisher nicht existente Merkmale<sup>50</sup> oder Merkmalskombinationen entstehen.

48 Allel: Alternative Version einer DNA Sequenz, meist eines Gens. In menschlichen Körperzellen finden sich zwei Exemplare jeder Gensequenz; die eine stammt von der Mutter, die andere vom Vater [Fisc-02, Seite 120].

49 Homologes Chromosom: das jeweils korrespondierende Chromosom des anderen Elternteils. Beispiel: Jede Körperzelle des Menschen enthält 23 Chromosomenpaare. In jedem Paar sind die Chromosome zueinander homolog.

50 Anmerkung: ... „Genetiker benutzen den Begriff Merkmal für eine erbliche Eigenschaft wie zum Beispiel

Eine *Mutation* ist eine Veränderung des Erbgutes eines Organismus durch Veränderung der Abfolge der Nukleotidbausteine oder durch Veränderung der Chromosomenzahl, die nicht auf Rekombination oder Reifeteilung (Meiose) beruht. Mutationen lassen sich nach verschiedenen Kriterien unterscheiden: Erbllichkeit, Ursache, erfolgte Veränderung und nach den Folgen für den Organismus (siehe Anhang).

Die zwei auf Zufall beruhenden Prozesse Rekombination und Mutation erzeugen Variabilität im Genpool einer Population. Allerdings hat die Mutation meist keine Konsequenzen für den Organismus, in seltenen Fällen wirkt sie sich nachteilig oder vorteilhaft für den Organismus aus. Bei einer auf die Generationenfolge ausgelegten Zeitskala hängt die genetische Variabilität von Tieren und Pflanzen, die letztendlich eine Anpassung ermöglicht, jedoch weitgehend von der Rekombination ab.

Die natürliche *Selektion*, nach den Theorien von C. Darwin, ist der unterschiedliche Fortpflanzungserfolg, das heißt, die ungleiche Überlebens- und Fortpflanzungsfähigkeit von Individuen. Sie erfolgt durch die Wechselwirkung zwischen der Umwelt und der unter den einzelnen Organismen einer Population vorhandenen Variabilität. Das Produkt der natürlichen Selektion ist die Anpassung von Organismenpopulationen an ihre Umwelt (siehe auch [CaRe-03, Seite 511 f.]).

Mutation und Rekombination sind zufällige Prozesse, die ungerichtet – ohne Bezug zu dem Wert oder Unwert, den sie für die Individuen einer Art haben – ablaufen. Der Faktor, der die Evolution zu einem auf zunehmende Adaption und Ökonomisierung gerichteten Vorgang macht, ist die Selektion ([CLZ-96, Seite 882]). Neben der Mutation, Rekombination und Selektion gibt es weitere Evolutionsfaktoren, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll. Allen Evolutionsfaktoren gemeinsam ist, dass durch sie der Genotyp, das heißt die DNA, verändert wird. Diese Änderung kann zu Funktions- und Gestaltänderungen des neuen Organismus führen.

Die drei oben beschriebenen Themenschwerpunkte sind nochmals in Abbildung 15 zusammengefasst dargestellt.

<b>Informationsträger</b>	<b>Entstehung eines Individuums</b>	<b>Entwicklung über Generationen hinweg</b>
DNA	Ontogenese	Phylogenese
<b>Bestandteile</b>	<b>Bestandteile</b>	<b>Bestandteile</b>
- Basen - Chromosome	- Zellen	- Organismen
<b>Informationseinheiten</b>		
- Codons - Gene		
<b>Prozesse</b>	<b>Prozesse</b>	<b>Prozesse</b>
- Transkription / Translation - Proteinsynthese	- Zellteilung - Differenzierung - Gestaltbildung  - transcriptionelle Regulation	- Rekombination - Mutation  (- Selektion)
<b>Produkte</b>	<b>Produkte</b>	<b>Produkte</b>
- Aminosäuren - Proteine	- Organe - Organismen	- Arten

*Abbildung 15: Themenschwerpunkte Natur*

### 3.2.3 Biologie und Produktentwicklung

Die oben ausgewählten Themen aus der Biologie sollen nun in Hinblick auf die Produktentwicklung in der Automobilindustrie im Allgemeinen und in Hinblick auf das Anforderungsmodell im Besonderen gegenübergestellt und diskutiert werden.

#### Informationsbestandteile

In der Natur sind die kleinsten Bestandteile, die zum Aufbau von Information dienen, die Basen bzw. Basenpaare. Beschränkt man sich auf die DNA, so gibt es deren vier. Die kleinsten Bestandteile im Anforderungsmanagement sind die Begriffe aus der entsprechenden Domäne (zum Beispiel: Differential, Tankvolumen, muss, NCAP). Zählt man die Synonyme und die zusammengesetzten Begriffe mit, so gibt es davon mehrere tausend.

## Informationsträger

Der Ort, an dem die Information für die gesamte Struktur und Funktion des biologischen Organismus vorgehalten wird, ist die DNA. Für gewöhnlich liegt in jeder Zelle eines mehrzelligen Organismus diese Information nahezu identisch vor, mit anderen Worten: sie ist hochgradig redundant gespeichert. Die heutige Produktentwicklung zeigt diesbezüglich keine Parallelen. Die komplette Information über die Struktur und Funktion eines Fahrzeugs wird heutzutage üblicherweise informationstechnisch verwaltet, allerdings nicht an einem Ort<sup>51</sup>. Zwar gibt es auch redundante Informationen in der Automobilentwicklung, jedoch ist der Grund hierfür ein anderer. In der Natur ist die Redundanz für die Replikation von Zellen notwendig. In der Produktentwicklung ist die Redundanz eine Schwäche im Prozess. Mehr oder weniger entkoppelte IT-Systeme bewirken, dass auf Grund des menschlichen Bestrebens „ja nichts zu vergessen“ Teilinformationen in mehreren Systemen redundant gehalten werden – einschließlich dem damit verbundenen Problem der Inkonsistenz. Auch auf Grund verschiedener Integrationsebenen (Produkt, System, Komponente, Teil) kommt es zu Redundanz. Produktbeschreibungen sind nicht selten nach den Integrationsebenen ausgerichtet. In Folge dessen wird ein Teil der Information zu einer Integrationsebene in der nächst tieferen Integrationsebene wiederholt. Dies ist der Fall, wenn die Information in abgeschlossenen, entkoppelten Dokumenten zu den einzelnen Produktbestandteilen erstellt wird.

## Kleinste interpretierbare Informationseinheit

Die kleinste interpretierbare Informationseinheit in der Natur ist ein Codon. Jeweils ein Codon (Basentriplett) wird bei der Proteinsynthese interpretiert und als eine der 20 möglichen Aminosäuren synthetisiert. In der Produktentwicklung und dort speziell im Anforderungsmanagement ist die kleinste interpretierbare Informationseinheit ein nach Anforderungselementen klassifizierter Begriff (Beispiele: Eigenschaft - elegant, Gewichtung - muss, Produktelement - Querträger).

## Kleinstes Charakteristikum eines Individuums

Die Gene, das heißt definierte DNA-Abschnitte, beinhalten die Information zur Bildung von Proteinen. Die Proteine realisieren die Funktionen eines biologischen Organismus auf Molekülebene. Die kleinste beschreibende Einheit in der Produktentwicklung ist die Produkthanforderung. Klammert man die Lösungs- und Schnittstellenanforderungen aus, so beschreiben diese Charakteristika des Produktes. Wenn dieser Vergleich überhaupt zulässig ist, so sind noch am ehesten

---

<sup>51</sup> zumindest ist dem Autor kein Unternehmen in der Automobilbranche bekannt, das derartige Produktinformationen ganzheitlich in einer Form und in nur einem IT-System hält.

die Merkmalsanforderungen mit den Genen vergleichbar. Merkmalsanforderungen beschreiben, wie der Name schon sagt, Merkmale des Produktes. Merkmale stehen oft im engen Zusammenhang mit Funktionen (Beispiel: Funktion - beschleunigen, Merkmal - Beschleunigung).

### **Funktionale Einheiten**

Funktionale Einheiten können in der Biologie auf zwei Ebenen betrachtet werden. Zum einen innerhalb der Zellen. Dort sind die kleinsten funktionalen Einheiten Zellbestandteile - die Organellen. Zum anderen schließen sich bei mehrzelligen Organismen spezialisierte Zellen zu funktionalen Einheiten zusammen, den sogenannten Organen. Funktionale Bestandteile in Produktentwicklung bilden die Bestandteile des Produktes (zum Beispiel: Wischersystem).

### **Individuum**

Ein Individuum in der Biologie ist entweder ein Einzeller oder ein Mehrzeller, wobei letzterer meist durch spezialisierte Zellen gekennzeichnet ist, und die einzelne Zelle auf sich gestellt auf Dauer nicht lebensfähig ist. Entscheidend bei allen Organismen ist, dass diese Kennzeichen des Lebens besitzen wie Selbstreproduktion, Reaktion auf Umweltveränderungen und Wachstum, um nur einige zu nennen. Etwas direkt Vergleichbares wie einen Organismus in der Produktentwicklung gibt es derzeit nicht.

### **Entstehung eines Individuums**

Die Entstehung eines Individuums (Ontogenese) in der Natur ist ein überaus komplexer Prozess, dessen Subprozesse noch nicht bis in jedes Detail erforscht sind. Tatsache ist jedoch, dass der Wachstumsprozess auf der Zellteilung basiert. Auch können sich Zellen spezialisieren<sup>52</sup> und im Verbund Organe ausbilden. Beides zusammen, das heißt die Zellteilung und die Differenzierung, trägt zur Gestaltbildung (Morphogenese) bei. Charakteristisch für die Zellteilung ist, dass bei jeder Teilung das Genmaterial kopiert wird. Der Vergleich mit der Produktentwicklung fällt auch hier schwer, allein schon auf Grund der Tatsache, dass es in der Produktentwicklung nichts Vergleichbares wie eine biologische Zelle gibt. Trotzdem entsteht am Ende der Entwicklung ein Produkt. Es gibt ansatzweise Parallelen zwischen Lastenheft und der DNA, das heißt einem Träger der Eigenschaften und Merkmale. Was jedoch im Lastenheft fehlt, ist der Prozess der beschreibt, wann und

---

<sup>52</sup> Synonym zu „spezialisieren“ ist „differenzieren“.

wie die Eigenschaften und Merkmale in ein Produkt umgesetzt werden. Die Prozessbeschreibung in einem Fahrzeugentwicklungsprozess existiert getrennt vom Lastenheft. Die Abwicklung dessen, das heißt die Umsetzung des Lastenhefts, geschieht über den Menschen.

Für die Zellteilung und die Differenzierung lässt sich kein Vergleich finden.

### **Entwicklung über Generationen hinweg**

Die Evolution hat seit der Entstehung von Leben auf der Erde (vor ca. 3,5 Milliarden Jahren [CaRe-03, Seite 608]) eine für den Menschen unüberschaubare Artenvielfalt hervorgebracht. Auch haben sich im Laufe der Zeit immer komplexere Lebewesen entwickelt (siehe auch Abbildung 16<sup>53</sup>). Ursache für die Artenvielfalt sind nach den Darwinschen Theorien Mutationen. Die Anpassungsfähigkeit oder genauer der Fortpflanzungserfolg von Individuen (Selektion, siehe auch [CaRe-03, Seite 511 f.]) bestimmt, ob eine Art überlebensfähig ist. Um die Variantenvielfalt und somit auch die Wahrscheinlichkeit für den Fortbestand einer Art zu erhöhen, hat sich die Natur einen weiteren Trick einfallen lassen: die Rekombination. Hierbei wird Genmaterial von zwei Eltern neu kombiniert. In der Produktentwicklung hat seit dem Bau des ersten Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor<sup>54</sup> auch eine Art Evolution im Automobilbau abgespielt. Es ist unbestreitbar, dass die Vielfalt zugenommen hat und weiter zunimmt. Ebenso ist im Mittel eine Zunahme an Komplexität zu verzeichnen, da die Fahrzeuge über immer mehr Funktionen verfügen. Auch eine Art „Mutation“ ist erkennbar, das heißt ein Teil der Eigenschaften und Merkmale ändert sich von Fahrzeuggeneration zu Fahrzeuggeneration. Die „Selektion“, gemeint ist der Verkaufserfolg eines Produktes, bestimmt der Markt. Eine Art „Rekombination“ ist in der heutigen Automobilentwicklung ebenfalls vorhanden. So werden oftmals stylingunabhängige Fahrzeugbestandteile ähnlicher Fahrzeuge neu zusammengestellt.

### **3.2.4 Zusammenfassung**

Seit der Entstehung des Lebens auf diesem Planeten hat die Komplexität der Organismen zugenommen. Dies bedeutet nicht, dass Lebewesen grundsätzlich komplexer geworden sind, aber es haben sich Arten herausgebildet, die ein hohes Maß an Komplexität aufweisen (Abbildung 16).

---

53 Abb. 16a in Anlehnung an [CaRe-03 Seite 566 f.]

54 Im Jahr 1885, Carl Friedrich Benz

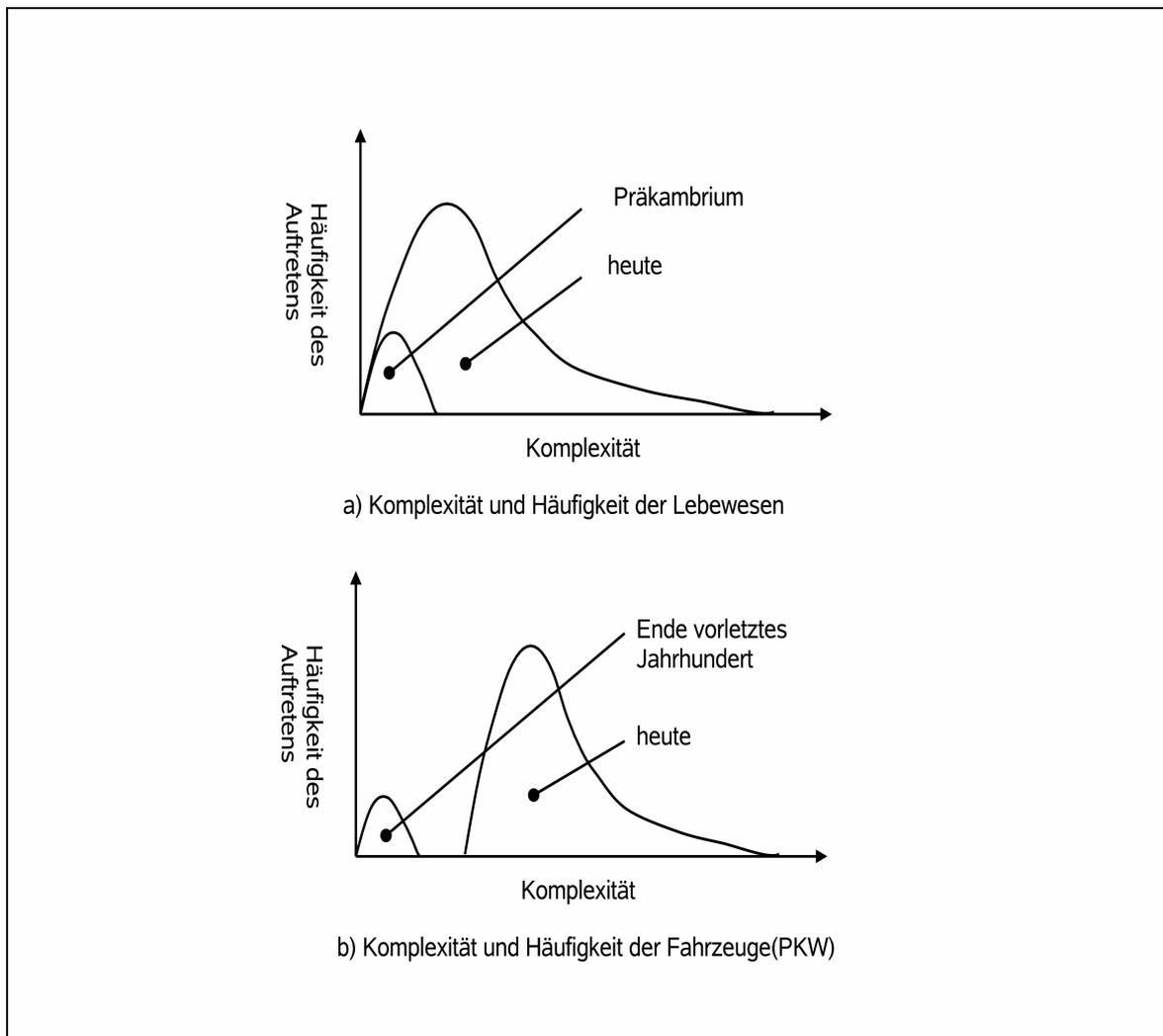


Abbildung 16: Komplexität und Häufigkeit von Lebewesen und Fahrzeugen (schematisch)

In der Automobilindustrie verhält es sich etwas anders. Zwar unterliegt die Komplexität auch einer Häufigkeit (unter anderem produkt- und marktabhängig), jedoch ist grundsätzlich eine Zunahme der Komplexität im Laufe der Zeit zu beobachten (Abbildung 16 b). Eine Zunahme an Komplexität bedeutet unter anderem eine Zunahme an Funktionalität und folglich auch der Eigenschaften und Merkmale, aber auch an Bestandteilen und Vernetzung. In diesem Sinne wird die Zunahme an Eigenschaften und Merkmalen sowie deren Vernetzung im nächsten Kapitel nochmals zur Definition des Begriffs *Produktevolution* aufgegriffen.

Die Ausprägung von Organen und letztendlich des gesamten Organismus unter dem Vorhandensein eines „Bauplans“ spielt in der Natur bei der Individualentwicklung eine wichtige Rolle. Diese Betrachtung führt im nächsten Kapitel zur Definition des *Produktwachstums*.

Mit dem Hintergrundwissen aus der Natur kann man Überlegungen und Forderungen an das Anforderungsmodell stellen.

Die Information in der Natur ist auf wenige Grundbestandteile beschränkt (4 bzw. 5 Basen). Die Vielfalt der Eigenschaften ergibt sich aus der Kombination der Grundbestandteile.

Forderung 4:

Das Anforderungsmodell soll aus „wenigen“ Grundbestandteilen bestehen.

In der Natur ist die vollständige Information über den strukturellen Aufbau und der Ablauf der Entwicklung an einer Stelle gespeichert: in der DNA.

Forderung 5:

Die Information über den strukturellen Aufbau sowie die zeitliche Information über die Produktentwicklung sollen eine zusammenhängende, logische Einheit bilden.

In der Natur gibt es die grundlegenden strukturellen und funktionalen Einheiten (Zellen). Zwei Charakteristika dieser Einheiten sind zum einen, dass sie die Information über Eigenschaften besitzen und auch verkörpern, zum anderen, dass in diesen Einheiten Vorgänge stattfinden.

Forderung 6:

Es soll im Modell funktionale Einheiten geben, welche Charakteristika des Produktes sowohl beinhalten als auch verkörpern.

Forderung 7:

Die funktionale Einheiten sollen die Vorgänge der Produktentstehung unterstützen.

Eine Sorte von funktionalen Einheiten in der Biologie besitzt die Fähigkeit, sich zu differenzieren (Stammzellen). Eine Fähigkeit, die übrigens nach erfolgter Differenzierung verloren geht. Die Differenzierung ist von Bedeutung, da mit ihr Funktionen realisiert werden.

Forderung 8:

Die funktionalen Einheiten sollen die Fähigkeit der Differenzierung besitzen.

Die Natur hält bei der Entstehung von höheren Lebewesen Alternativen vor (Allele). Homologe Merkmale führen zu Varianten von Bestandteilen des Organismus (Rekombination).

Forderung 9:

Das Modell soll homologe Merkmale berücksichtigen.

In diesem Kapitel wurden drei ausgewählte Themen der Biologie angeschnitten und aus natürlichen Gegebenheiten erste Forderungen an ein Anforderungsmodell gestellt. Bei der Erstellung des Modells in Kapitel 3.3 werden diese Forderungen berücksichtigt und auch Vergleiche, insbesondere in Hinblick auf die DNA, das Individualwachstum und der Evolution erneut herangezogen.

## 3.3 Anforderungsmodell

### 3.3.1 Einleitung

In Kapitel 3.1 wurden grundlegende Begriffe für das Anforderungsmanagement definiert, zum Teil aufbauend auf ähnlichen existierenden Begriffen, zum Teil neu. Mit diesen Begriffen und der speziellen Sicht auf die Produktentwicklung analog zur Natur aus Kapitel 3.2 soll nun ein Anforderungsmodell<sup>55</sup> aufgezeigt werden, das die Grundlage für eine integrative Produktentwicklung liefert. Das Modell wiederum wird hierzu in zwei Submodelle aufgeteilt: ein Evolutionsmodell und ein Wachstumsmodell. Auch werden neue Begriffe definiert, deren Ursprung in der

---

<sup>55</sup> im Rahmen der Arbeit einfach nur als „Modell“ bezeichnet

Biologie liegt, jedoch für die Belange des Modells, in Hinblick auf die Produktentwicklung, abgewandelt werden. Analogien aus der Natur werden für eine neue Sichtweise auf eine ganzheitliche Produktentwicklung herangezogen.

### 3.3.2 Produktevolution (ideal)

Seit Carl Friedrich Benz im Jahre 1885 das erste Automobil baute, haben sich die Fahrzeuge in ihrem Leitungsumfang extrem weiterentwickelt. Das erste Fahrzeug mit Verbrennungsmotor hatte drei Räder, 0,6 kW Leistung und erreichte eine Höchstgeschwindigkeit von 16 km/h. Die heutigen PKWs haben für gewöhnlich 4 Räder, teilweise mehrere hundert kW Leistung und Höchstgeschwindigkeiten von oftmals über 200 km/h. Des Weiteren sind sie mit Rückhaltesystemen, ABS, EPS<sup>56</sup> und vielem mehr ausgestattet. Der Funktionsumfang eines Fahrzeugs hat im Laufe der Jahrzehnte immens zugenommen, und da sich Funktionen über Eigenschaften und Merkmale des Produktes definieren, diese ebenfalls. Um dies berücksichtigen zu können, soll zur Erklärung des Anforderungsmodells ein neuer Begriff eingeführt werden.

#### **Definition 17:** Produktevolution

Die Produktevolution ist die Zunahme von Eigenschaften oder Merkmalen eines Produktes und seiner Bestandteile in Qualität und Umfang.

Diese Definition trifft keine Aussage darüber, ob dieser Begriff über den gesamten Zeitraum der bisherigen Automobilgeschichte oder nur im Rahmen eines Fahrzeugprojektes zur Anwendung kommt. Er soll beidem Rechnung tragen.

Wahrgenommen wird die Produktevolution meist nur von Fahrzeuggeneration zu Fahrzeuggeneration. Die Produktevolution selbst findet genau genommen innerhalb der Fahrzeugprojekte statt. Die Eigenschaften und Merkmale sind Bestandteile der Produkthanforderungen. Diese können zwar von Projekt zu Projekt als Vorschlag übernommen werden, müssen aber durch die Entscheidungsträger im Rahmen des Entwicklungsauftrags erst bestätigt werden, bevor sie gültig sind. Von der ersten Fahrzeuganforderung bis zur letzten Komponenten- oder Teileanforderung findet somit auch eine Zunahme der Produkthanforderungen und dadurch der Eigenschaften und Merkmale statt.

Die Qualität in Definition 17 bezieht sich auf die messbaren Anteile von Anforderungen. Das Maß für die Qualität ist hier die Abweichung des ersten Zielwertes in den Produkthanforderungen von dem erreichten Wert des realisierten

<sup>56</sup> ABS = Antiblock System (Antiblockiersystem), EPS = Electric Power Steering (Elektrische Servolenkung)

Produktes am Ende des Entwicklungsprozesses. Es ist zu beobachten, dass die Vorgaben zu Beginn eines Projektes heute meist näher am erzielten Ergebnis liegen als in der Vergangenheit. Grund hierfür ist sowohl die Wiederverwendung von Messergebnissen aus Vorgänger- oder Vergleichsprojekten als auch die Zuhilfenahme von Berechnungswerkzeugen bei der Erstellung von Produkthanforderungen.

Als Anmerkung zur Definition 17 (Seite 70) sei darauf hingewiesen, dass die Produktevolution in diesem Kapitel als ideal anzusehen ist, das heißt Überlagerungen aus Wachstumsprozessen werden vorerst ausgeblendet. Was dies bedeutet, wird in Kapitel 3.3.3 noch genauer dargelegt.

Zur Produktevolution gehört, ähnlich wie in der Natur, ein Träger der Information: die *Produkt-DNA*.

**Definition 18:** Produkt-DNA

Die Produkt-DNA (P-DNA) ist die Menge aller Produktelemente, deren Eigenschaften und Merkmale sowie deren Beziehungen untereinander, die zur Entwicklung des Produktes notwendig sind.

Das Wort „notwendig“ in Definition 18 zielt auf die Genauigkeit der Produktbeschreibung ab. Es ist in einem Fahrzeugprojekt nicht praktikabel im Rahmen einer Produktdefinition jeden einzelnen Produktbestandteil bis ins kleinste Detail zu definieren. Es genügt vollkommen, das Produkt soweit zu beschreiben, dass es realisiert werden kann. Ein Grad der Auflösung kann nicht angegeben werden, weil dieser stark von den Rahmenbedingungen im Unternehmen (zum Beispiel: Ressourcen und Know-how der Mitarbeiter) und der Entwicklungsstrategie abhängt (zum Beispiel die Auswärtsentwicklung von Komponenten bis hin zum gesamten Produkt).

Definition 18 schließt auch die Beziehungen zwischen den Produktelementen bzw. seiner Bestandteile mit ein. Drei Arten von Beziehungen sind hierbei gemeint: Zum Ersten *vertikale Beziehungen*, die beim Aufbau der Produkt-DNA entstehen, aber auch bei der Integration von Produktbestandteilen hilfreich sind. Zum Zweiten *horizontale Beziehungen*, welche die Funktionalität der Produktbestandteile untereinander beschreiben. Zum Dritten Abhängigkeiten innerhalb oder zwischen Produktelementen, welche die Eigenschaften oder Merkmale des Produktes oder seiner Bestandteile einschränken.

Die Produkt-DNA lässt offen, wie das Produkt am Ende der Produktentwicklung aussieht. Sie zeigt nur eine Struktur auf, welches die beschreibenden Bestandteile sind und wie sie in Beziehung zueinander stehen.

Im Zusammenhang mit der Produkt-DNA wird in der vorliegenden Arbeit auch des öfteren von einer *Initialen Produkt-DNA* gesprochen. Damit ist die allererste Produkt-DNA in einem Unternehmen für eine bestimmte Art von Produkt (zum Beispiel: PKW) gemeint. Diese wird im Rahmen eines Projektes erzeugt. In allen nachfolgenden Projekten, die Weiterentwicklungen dieser Art von Produkt darstellen, kann auf diese oder den nachfolgenden Produkt-DNAs aufgebaut werden.

Der Wunschtraum der Produktentwickler ist ein „parametrierbares Produkt“. Damit ist gemeint, das Produkt (im Wesentlichen) mit Hilfe von Merkmalen zu beschreiben, wobei Produktvarianten durch Änderungen der Merkmalswerte auf schnelle Art und Weise erzeugt werden können. In der CAD-Welt stellt die Arbeit mit parametrierbaren Produktbestandteilen heutzutage eine gängige Methode dar, allerdings nur für die Geometrie. An dieser Stelle kann die Produkt-DNA den Ansatz für die parametrische Beschreibung des Produktes liefern. Dies bedeutet für ein Fahrzeugprogramm, dass basierend auf der Produkt-DNA durch Anpassung der Anforderungselemente für ein bestimmtes Projekt sehr schnell die Produktdefinition erstellt werden kann. Des Weiteren könnten auch innerhalb von Fahrzeugprojekten, auf relativ einfachem Wege Prototypen für einen bestimmten Prüfzweck beschrieben werden.

Mit den bisher definierten Begriffen wird nachfolgend ein „ideales“ Evolutionsmodell aufgebaut. Das Adjektiv „ideal“ verstärkt hier die Modellhaftigkeit, weil, wie später in Kapitel 3.3.3 beschrieben, dem Evolutionsprozess ein Wachstumsprozess überlagert ist. Für das Evolutionsmodell werden drei drei Annahmen getroffen:

- Eine generische Produktstruktur existiert
- Eine generische Eigenschafts- und Merkmalsstruktur existiert
- Die Normalisierung von Produkthanforderungen ist vorerst ausreichend

Unter diesen Annahmen wird das Prinzip der Produktevolution erklärt. Was es mit der Produkt-, Eigenschafts- und Merkmalsstruktur auf sich hat, wird in Kapitel 4 eingehend erläutert. Vorerst genügt es zu wissen, dass die Produktstruktur die Begriffe für die Produktelemente, die Eigenschafts- und Merkmalsstruktur die Begriffe für die Eigenschaften und Merkmale bereitstellt. In Kapitel 4 wird auch ausgeführt werden, dass die Normalisierung zwar die semantische Zerlegung der Produkthanforderung liefert, jedoch noch nicht für ein IT-gestütztes Management von Produkthanforderungen.

Die Produkt-DNA kann man sich grundsätzlich als ein Netzwerk von Produkt-elementen mit Eigenschaften und Merkmalen vorstellen, das von einer Wurzel ausgehend, von innen nach außen wächst. Gemäß dem V-Modell wird ein Fahrzeug

„top-down“, das heißt von Fahrzeugebene, über Systeme hin zu Komponenten definiert. Bezogen auf die Produkt-DNA ist die Wurzel das Fahrzeug, die Äste bilden die Systeme, und die Blätter sind die Komponenten, sofern man drei Ebenen von Produktelementen annimmt<sup>57</sup>. Die Baumstruktur verwandelt sich in dem Augenblick in eine Netzstruktur, in dem die Elemente des Baumes miteinander „horizontal“ vernetzt werden.

Produktanforderungen existieren auf allen Abstraktionsebenen des Produktes. Für gewöhnlich folgt die Erfassung der Produkthanforderungen dem Top-down-Ansatz gemäß dem linken Ast des V-Modells. Produkthanforderungen des Produktes werden sukzessive verfeinert und auf die Produktbestandteile verteilt. Dieser Vorgehensweise liegen drei Prinzipien zu Grunde:

### **Normalisierung**

Das erste Prinzip – die Normalisierung<sup>58</sup> – ist die Zerlegung einer nicht normalisierten Produkthanforderung in mehrere normalisierte Produkthanforderungen. Das Ergebnis der Normalisierung ist eine Menge von normalisierten Produkthanforderungen, die den Definitionen 12, 13 und 14 genügen. Die Normalisierung ist für die computergestützte Verarbeitung von Anforderungen eine wichtige, wenn auch nur notwendige Voraussetzung.

### **Transformation**

Das zweite Prinzip ist die sogenannte Transformation

#### **Definition 19:** Transformation

Die Transformation ist die Überführung

entweder

einer Eigenschaftsanforderungen in eine oder mehrere Merkmals- oder Lösungsanforderungen

oder

einer Merkmalsanforderung in eine oder mehrere Lösungsanforderungen.

Das Prinzip der Transformation liefert keine Aussage darüber, ob die Transformation innerhalb des Produktelementes stattfindet (*Intra-Transformation*) oder neue Produktelemente erzeugt oder bestehende Produktelemente verändert werden (*Inter-Transformation*). Beispiel für eine Transformation: „Der Fensterheber muss

<sup>57</sup> Inwieweit es sinnvoll ist, bis auf Teileebene herunterzubrechen, sei dahingestellt

<sup>58</sup> siehe Definition 11, Seite 45

mit einem Einklemmschutz ausgestattet sein“ wird transformiert in „Der Fensterheber muss bei einer maximalen Einklemmkraft von 10 N abschalten“. Dies ist eine Intra-Transformation einer Eigenschaftsanforderung in eine Merkmalsanforderung.

### Distribution

Das dritte Prinzip ist die Distribution.

#### Definition 20: Distribution

Die Distribution ist die Verteilung einer normalisierten Produktanforderung eines Produktelements auf ein oder mehrere, meist untergeordnete Produktelemente.

Ein Beispiel für die Distribution: „Das Fahrzeug soll sportlichen Charakter besitzen“. Diese Produktanforderung wird unter anderem verteilt auf die Reifen und die Zierleisten: „Die Räder sollen einen Durchmesser von mindestens 19 Zoll haben“ und „Die Zierleisten sollen verchromt sein“.

Alle drei Prinzipien werden im nachfolgenden Kapitel zur Beschreibung der so genannten *Ableitungen* benötigt. In der Produktentwicklung können durch Produktanforderungen weitere Produktanforderungen entstehen, dann nämlich, wenn eine Detaillierung oder Präzisierung der Produktanforderungen notwendig ist. Für diese Art von Beziehung zwischen Anforderungen auf Basis der Prinzipien Normalisierung, Transformation und Distribution wird der Begriff *Ableitung* eingeführt.

#### Definition 21: Ableitung

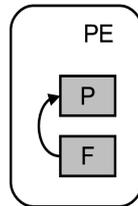
Eine Ableitung detailliert oder präzisiert eine Produktanforderung. Ableitungen bilden die vertikale Vernetzung innerhalb der Produkt-DNA.

Ableitungen zeigen den ursächlichen Zusammenhang zweier Produktanforderungen auf. Sie stellen damit die Rückverfolgbarkeit sicher.

Nachfolgend werden acht mögliche Typen für Ableitungen vorgestellt, die alle in der Praxis vorkommenden Fälle abdecken. Zur Darstellung wurde eine eigene Symbolik definiert<sup>59</sup>. Produktelemente werden als Rechtecke mit abgerundeten Ecken gezeigt. Eigenschaften und Merkmale sind als Rechtecke ausgeführt und Ableitungen als Pfeile. In der Symboldarstellung zeigt die Pfeilspitze der Ableitung immer auf das Anforderungselement, das die Ursache für die Ableitung bildet.

<sup>59</sup> siehe Anhang

Typ 1: Ableitung eines Merkmals aus einer Eigenschaft innerhalb desselben Produktelements



$$R_p := PE + I + P$$



$$R_f := PE + I + F$$

Beispiel:

Der Motor soll leistungsstark sein



Der Motor soll ein Drehmoment zwischen 220 und 250 Nm bei 3000 1/min aufweisen

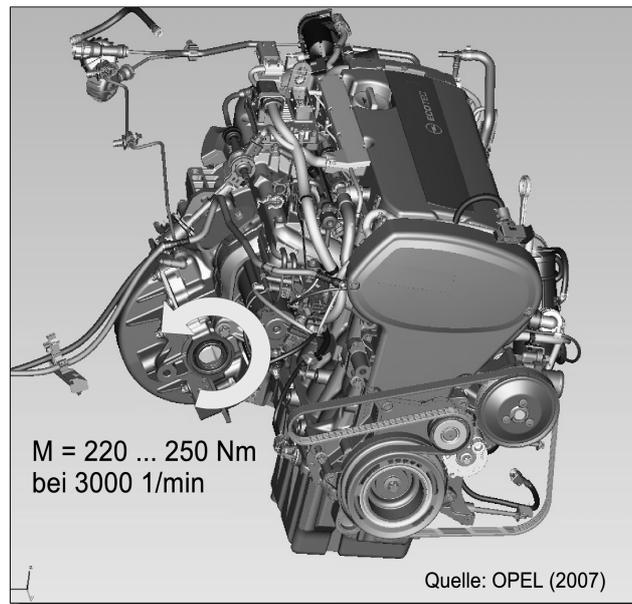


Abbildung 17: Ableitung - Typ 1: Ableitung eines Merkmals aus einer Eigenschaft innerhalb desselben Produktelements

Charakteristisch für Typ 1 ist, dass innerhalb desselben Produktelements aus einer Eigenschaftsanforderung eine Merkmalsanforderung abgeleitet wird.

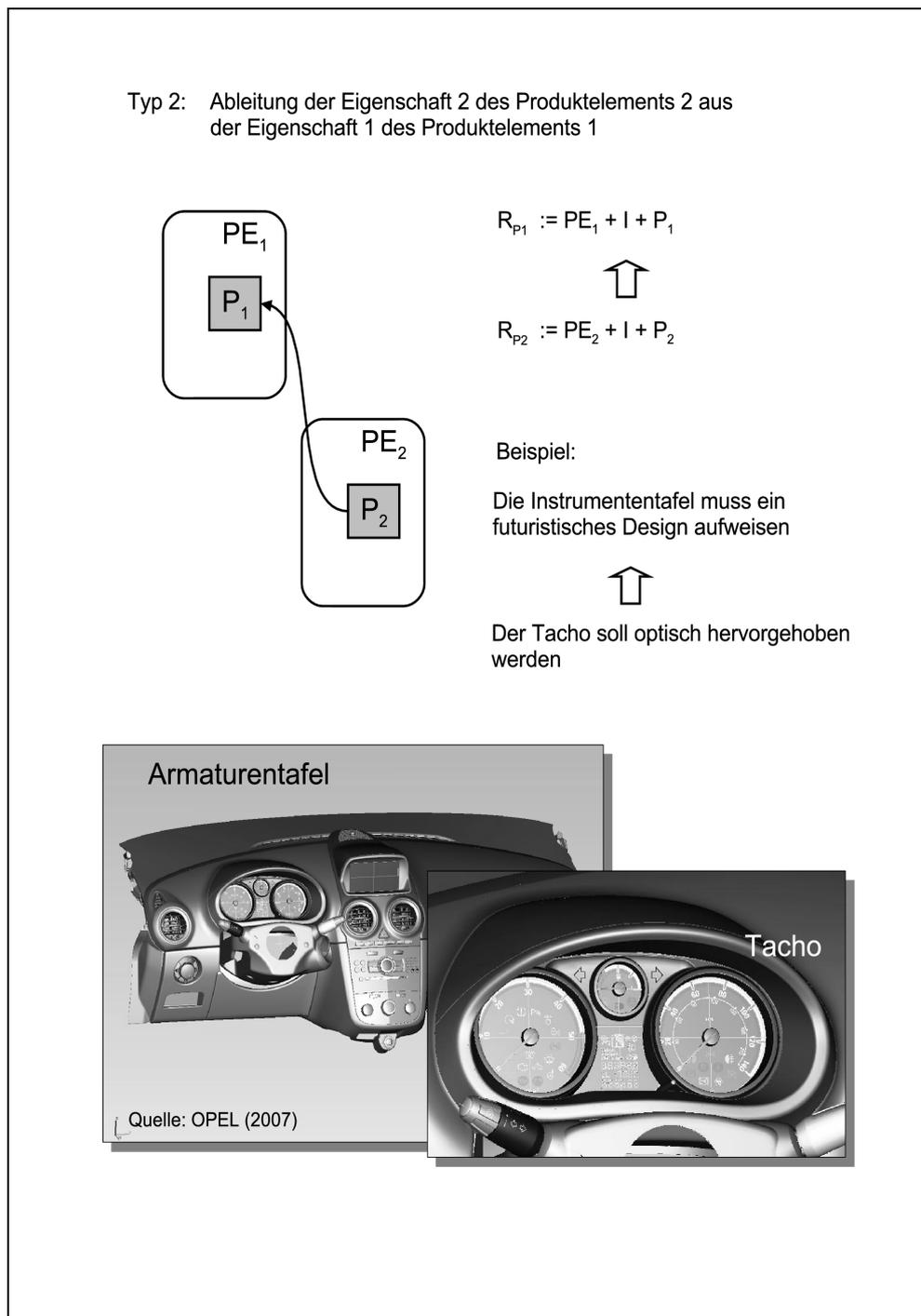


Abbildung 18: Ableitung - Typ 2. Ableitung der Eigenschaft 2 des Produktelements 2 aus der Eigenschaft des Produktelements 1

Typ 2 beschreibt die Situation, dass Eigenschaften untergeordneter Produktelemente aus Eigenschaften übergeordneter Produktelemente abgeleitet werden. Hierbei werden die untergeordneten Produktelemente erzeugt, sofern sie noch nicht existieren.

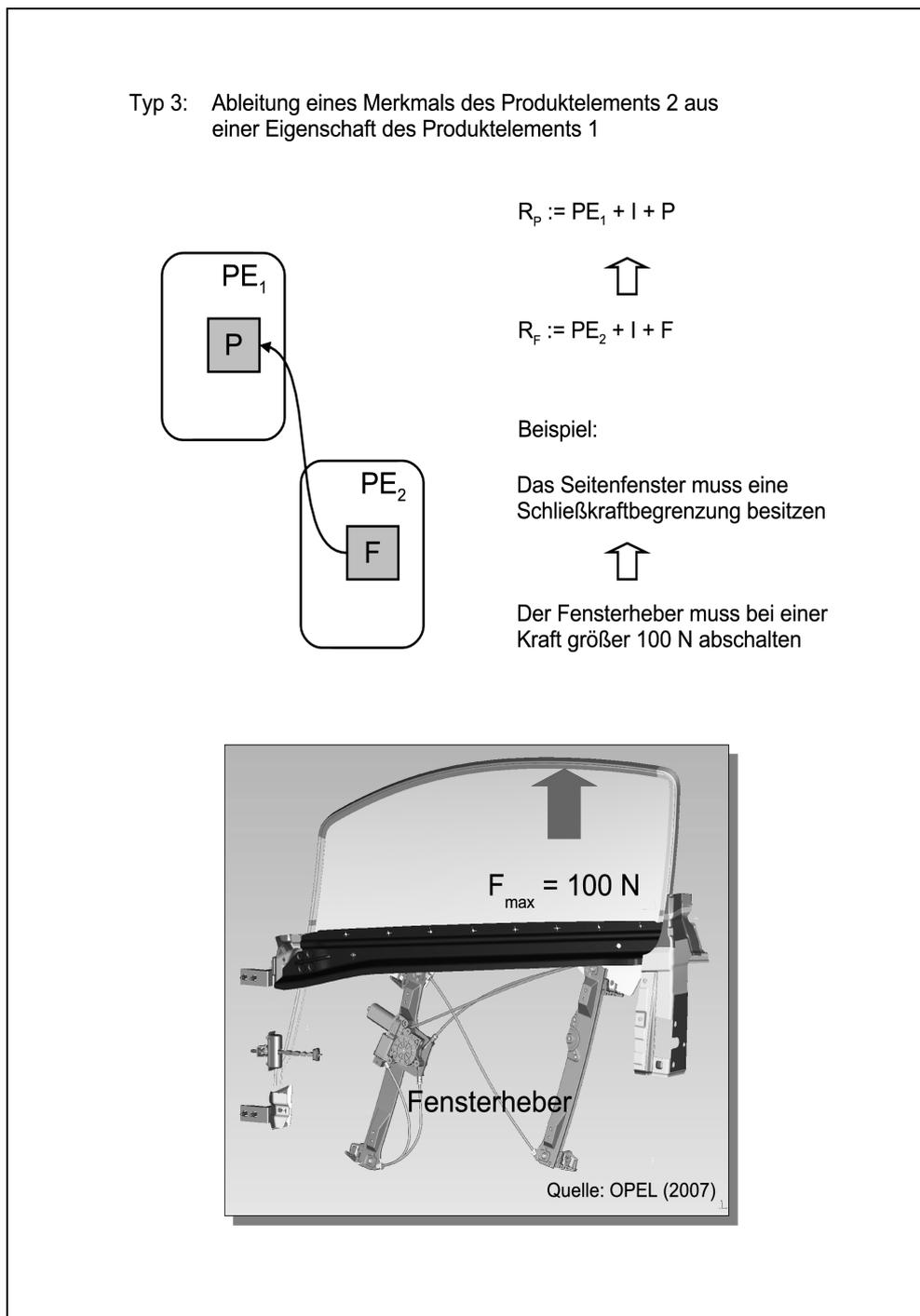


Abbildung 19: Ableitung - Typ 3. Ableitung eines Merkmals des Produktelements 2 aus einer Eigenschaft des Produktelements 1

Der Typ 3 ist eine verschärfte Variante von Typ 2: Aus einer Eigenschaftsanforderung eines übergeordneten Produktelements werden präzisere Anforderungen an untergeordnete Produktelemente abgeleitet.

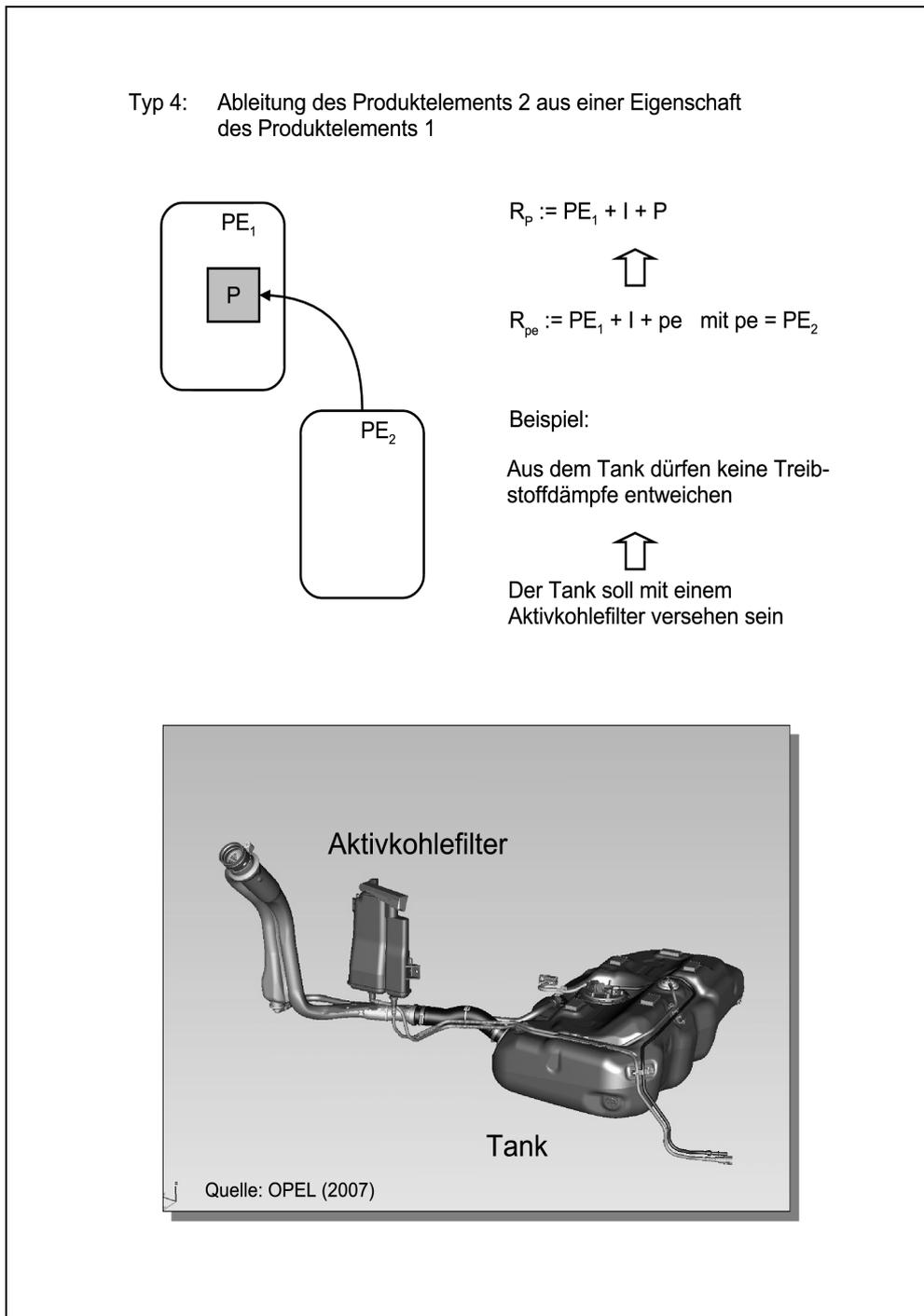


Abbildung 20: Ableitung - Typ 4. Ableitung des Produktelements 2 aus einer Eigenschaft des Produktelements 1

Im Beispiel ist  $PE_1$  der Tank und  $PE_2 = pe$  der Aktivkohlefilter. Die Ableitung vom Typ 4 bewirkt, dass ein untergeordnetes Produktelement erzeugt wird, sofern es noch nicht existiert.

Typ 5: Ableitung der Eigenschaft 2 aus der Eigenschaft 1 innerhalb desselben Produktelements

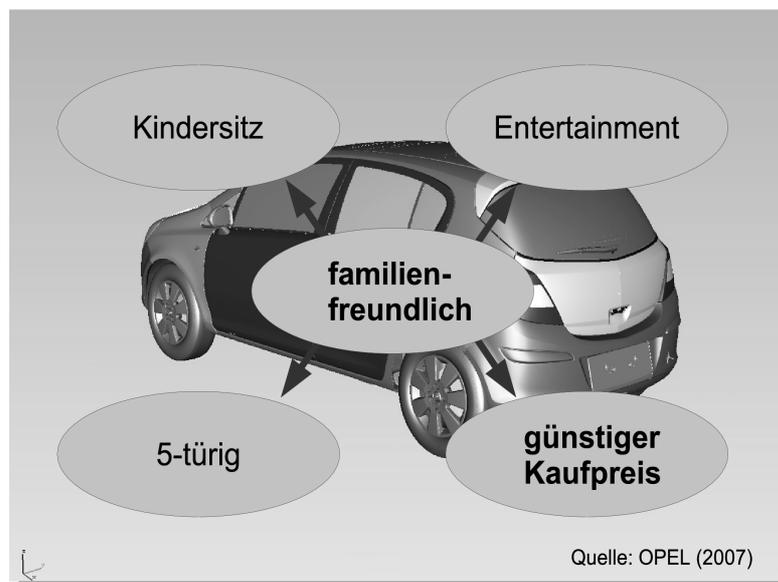
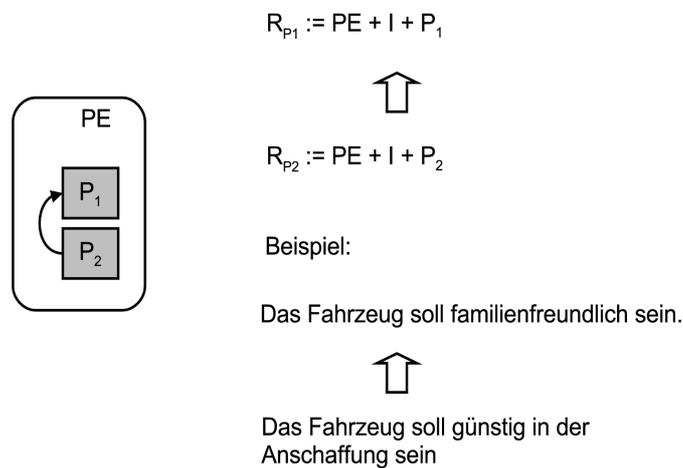


Abbildung 21: Ableitung - Typ 5. Ableitung der Eigenschaft 2 aus der Eigenschaft 1 innerhalb desselben Produktelements

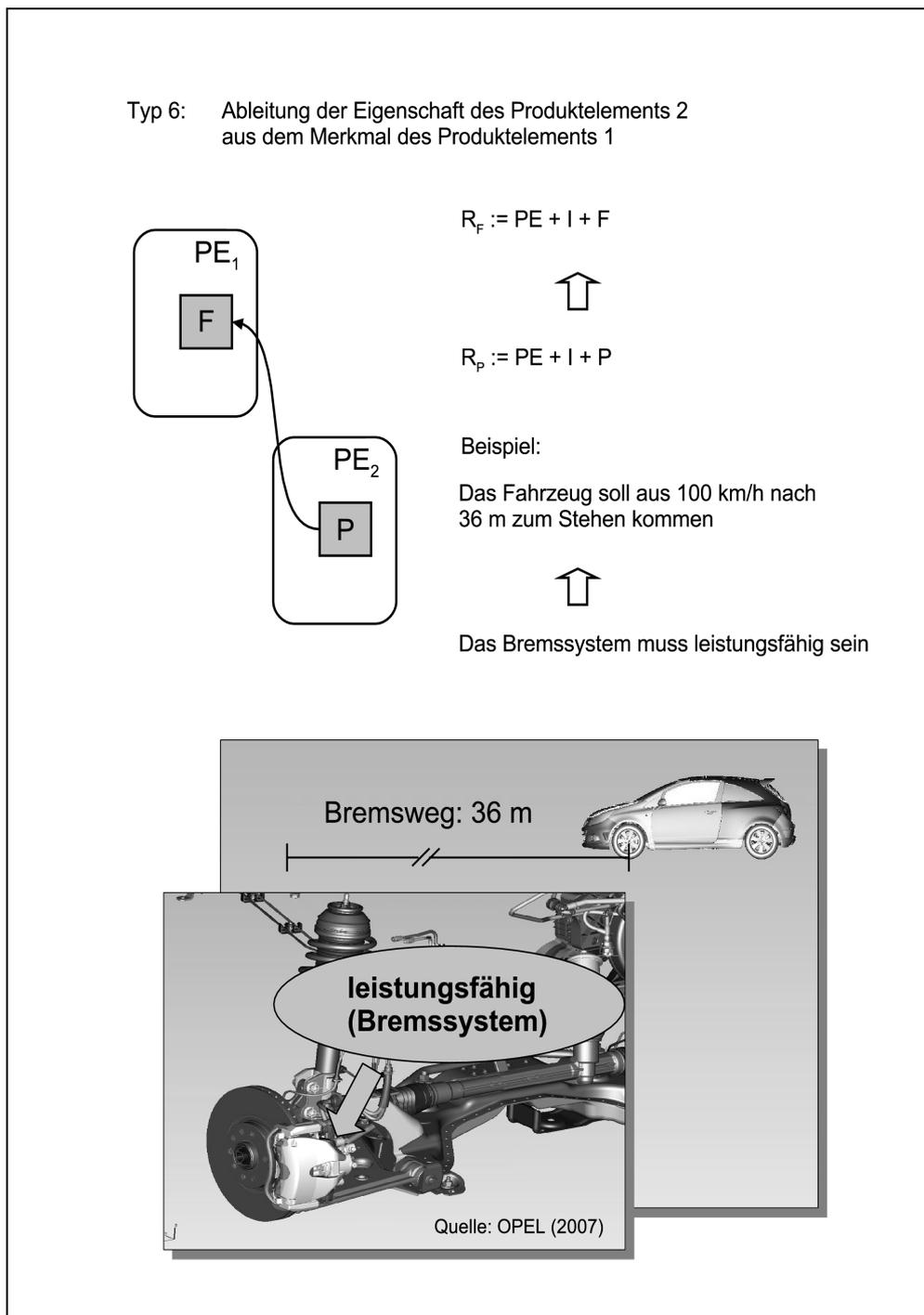
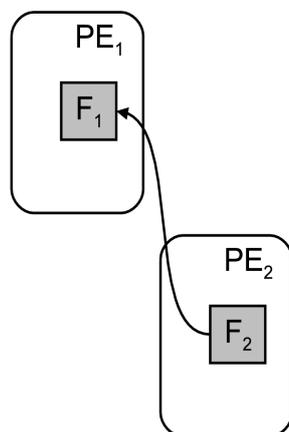


Abbildung 22: Ableitung - Typ 6. Ableitung der Eigenschaft des Produktelements 2 aus dem Merkmal des Produktelements 1

Der Typ 7 ist nicht zu verwechseln mit einer Schnittstellenanforderung (Definition 22, Seite 84) der Art: „Der Motor muss ein Drehmoment von 220 Nm an das Getriebe übertragen.“

Typ 7: Ableitung des Merkmals 2 des Produktelements 2 aus einem Merkmal des Produktelements 1



$$R_{F_1} := PE_1 + I + F_1$$



$$R_{F_2} := PE_2 + I + F_2$$

Beispiel:

Der Motor muss ein Drehmoment von mindestens 220 Nm abgeben



Das Getriebe muss ein Drehmoment von mindestens 220 Nm aufnehmen

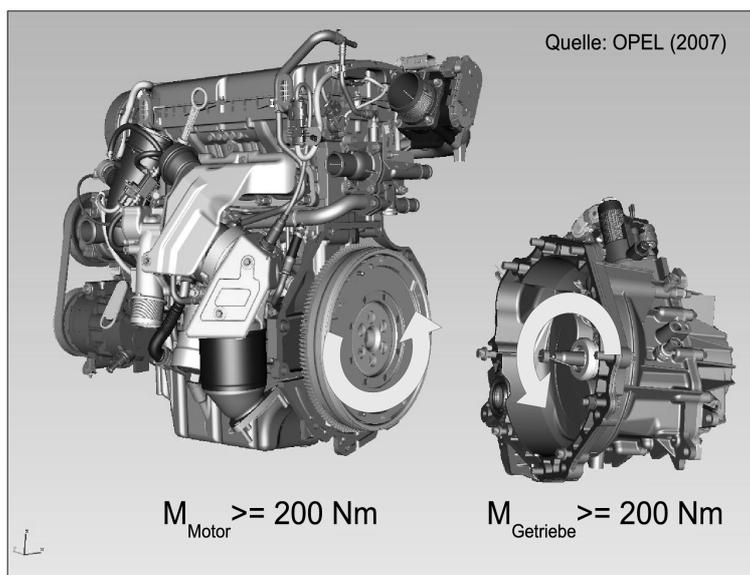


Abbildung 23: Ableitung - Typ 7. Ableitung des Merkmals 2 des Produktelements 2 aus einem Merkmal des Produktelements 1

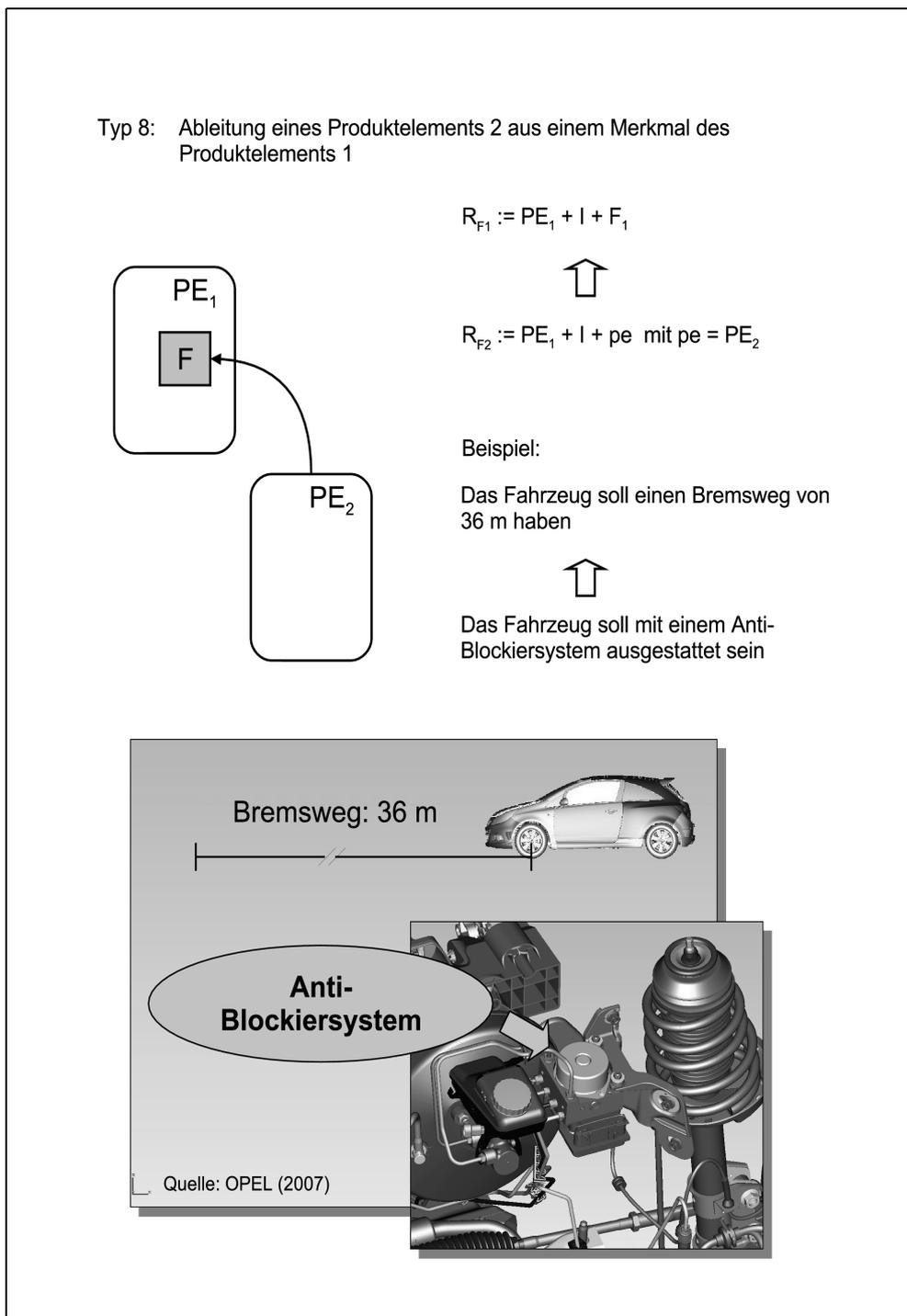


Abbildung 24: Ableitung - Typ 8. Ableitung eines Produktelements 2 aus einem Merkmal des Produktelements 1

Theoretisch sind noch zwei weitere Ableitungstypen denkbar:

Typ 9:

Ableitung einer Eigenschaft aus einem Merkmal innerhalb desselben  
Produktelements

$$R_P := PE_1 \oplus I \oplus P \quad \text{abgeleitet aus } R_F := PE_1 \oplus I \oplus F$$

Typ 9 soll ausgeschlossen werden, denn mit jeder Ableitung findet eine Präzisierung der Produkthanforderungen statt. Der Grad an Präzision zu einem Produktelement soll durch innere Ableitungen von der Merkmalsebene auf die Eigenschaftsebene nicht wieder verschlechtert werden.

Typ 10:

Ableitung eines Merkmals 2 aus Merkmal 1 innerhalb desselben Pro-  
duktelements

$$R_{F_2} := PE_1 \oplus I \oplus F_2 \quad \text{abgeleitet aus } R_{F_1} := PE_1 \oplus I \oplus F_1$$

Typ 10 ist theoretisch denkbar, wurde jedoch in der Praxis nicht beobachtet, was nicht ausschließt, dass dieser Fall trotzdem auftreten kann.

Die vertikale Vernetzung, generiert aus Ableitungen, bildet eine hierarchische Baumstruktur aus, wobei an einzelnen Stellen in der Struktur theoretisch auch Querverbindungen auftreten können. Der Strukturtyp wäre dann streng genommen eine nicht hierarchische Netzstruktur – falls er existiert.

Ableitungen sind maßgeblich am Prozess der Produktevolution beteiligt. Über die Ableitung findet eine Differenzierung der Produkthanforderungen statt, welche die Anzahl von Eigenschaften und Merkmalen zur Beschreibung des Produktes vergrößert. Auch steigt die Qualität der Produkthanforderungen, weil mit zunehmender Detaillierungstiefe die Produkthanforderungen präziser werden. Vom Prinzip her steigt die Genauigkeit von den Eigenschaftsanforderungen über die Merkmalsanforderungen bis zu den Lösungsanforderungen.

Die funktionale Zerlegung des Produktes in Bestandteile bringt es mit sich, dass zur Erfüllung der Gesamtfunktion die Produktelemente untereinander in Beziehung stehen müssen. Während Ableitungen die funktionale Zerlegung und die Rückverfolgung der Anforderungen sicherstellen, garantieren *Schnittstellen* das Zusammenspiel der Produktelemente untereinander.

**Definition 22:** Normalisierte Schnittstellenanforderung

Eine normalisierte Schnittstellenanforderung beschreibt die Beziehung zweier Produktelemente über eine Eigenschaft oder ein Merkmal.

$$L_n \in \{ L_{nP}, L_{nF} \}$$

mit  $L_{nP} := PE_1 \oplus I \oplus P \oplus PE_2$  (Schnittstellenanforderung Typ P)

$L_{nF} := PE_1 \oplus I \oplus F \oplus PE_2$  (Schnittstellenanforderung Typ F)

Ein Beispiel für eine Schnittstellenanforderung vom Typ P ist: „Der Gurtstraffer muss elektrisch mit dem Steuergerät gekoppelt sein“. Es wird hier nur eine Aussage über eine Eigenschaft der Kopplung getroffen, nicht jedoch über welche Merkmale.

Ein Beispiel für eine Schnittstellenanforderung vom Typ F ist: „Der Motor muss ein Drehmoment von maximal 360 Nm an das Getriebe abgeben“. Zwei Produktelemente stehen über ein gemeinsames Merkmal in Beziehung zueinander. Man könnte jetzt dem Gedanken verfallen, die Schnittstellenanforderung mit Hilfe zweier Produkthanforderungen zu beschreiben: „Der Motor muss ein Drehmoment von maximal 360 Nm abgeben“ und „Das Getriebe muss ein Drehmoment von mindestens 360 Nm aufnehmen“. Beide Produkthanforderungen sind notwendige Voraussetzungen für das Zusammenspiel von Motor und Getriebe, aber erst die Beziehung der beiden über das gemeinsame Merkmal liefert die hinreichende Voraussetzung für deren Zusammenspiel. Eine Schnittstellenanforderung ist somit mehr als nur die beiden einzelnen Produkthanforderungen.

Die Definition 22 fordert, dass entweder eine Eigenschaft oder ein Merkmal angegeben wird. Zwar könnte man sich die Schnittstellenanforderung auch ohne die Angabe von P oder F vorstellen. Die Anforderung würde dann einfach lauten: „Der Motor muss mit dem Getriebe verbunden sein“. Doch im Sinne des Modells ist diese Produkthanforderung sinnlos, da sie keine Aussage über die Art der Verbindung trifft. Auch dann nicht, wenn der Techniker auf Grund seines Wissens schließt, dass wahrscheinlich eine mechanische Kopplung gemeint ist.

Das Beispiel zeigt auch, dass es zwei Schnittstellen geben muss, nämlich eine am Motor und eine am Getriebe. Die Verbindung der Schnittstellen liefern die sogenannten Cross Links.

**Definition 23:** Cross Link

Ein Cross Link (CL) ist eine Beziehungen zwischen zwei Produktelementen. Cross Links gewährleisten die Funktion der Produktelemente im Verbund.

Charakteristisch für die Schnittstellenanforderungen gegenüber den Produktanforderungen sind Verben wie zum Beispiel „verbinden“, „verknüpfen“ oder „liefern“.

Die Begriffe für qualitative Cross Links stammen aus dem Bereich der Technik. So sind Adjektive wie „elektrisch“, „mechanisch“, „akustisch“, etc. für diese typisch. Klarheit bringt jedoch nur die Befragung des Anforderungsstellers.

Schnittstellenanforderungen werden mittels Cross Links repräsentiert. Graphisch werden Cross Links durch Verbindungslinien entweder zwischen den Produktelementen oder zwischen Merkmalen zweier Produktelemente dargestellt.

Es soll zwischen zwei Typen von Cross Links unterschieden werden: Typ P und Typ F (Abbildung 25).

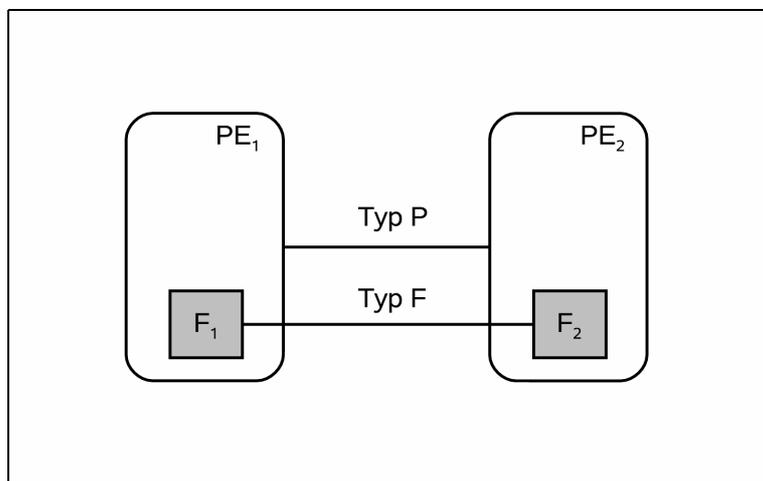


Abbildung 25: Cross Links

Um Fehlinterpretationen in der graphischen Darstellung zu vermeiden, folgendes Beispiel für eine Schnittstellenanforderung Typ P: „Der Schalthebel soll elektrisch mit den Getriebe gekoppelt sein“. Die Darstellung ist ein Cross Link von Typ P. Man könnte nun die Verbindungslinie als elektrisches Kabel interpretieren, doch dem ist nicht so. Dargestellt wird in diesem Fall nur der Typ (und eventuell auch die

Art, falls die Linie beschriftet wird). In Praxis würde man in den seltensten Fällen eine Auflösung der Produktelemente bis auf Teileebene anstreben. Folglich wird man das Verbindungskabel entweder dem Schalthebel oder dem Getriebe zuweisen.

Cross Links können auch gerichtet sein. In dem Beispiel (Typ F) „Der Motor soll ein Drehmoment von 360 Nm an das Getriebe abgeben“ würde der Pfeil vom Getriebe auf das verursachende Produktelement bzw. dessen Merkmal weisen. Die Verwendung von gerichteten Cross Links entspricht den Zählpfeilen in den Ingenieurwissenschaften. Die Ausrichtung der Zählpfeile geschieht wenn möglich in technischer Vorzugsrichtung<sup>60</sup>. An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass sich in manchen Situationen die Wirkrichtung umkehren kann (im Beispiel: Fahrzeug wird abgebremst).

Cross Links von Typ F erfüllen noch eine weitere Aufgabe. Sie tragen zur Vollständigkeit der Produktdefinition bei, indem sie sicherstellen, dass es zu einem Schnittstellenmerkmal  $F_1$  von  $PE_1$  auch das dazugehörige Schnittstellenmerkmal  $F_2$  von  $PE_2$  gibt.

Die horizontale Vernetzung der Produktelemente ist auf allen Abstraktionsebenen unterhalb des Gesamtproduktes möglich, wobei in den unteren Ebenen hauptsächlich Cross Links vom Typ F auftreten.

Alle bisher beschriebenen Typen von Beziehungen sind noch einmal zusammen in Abbildung 26 schematisch aufgezeigt.

Bisher wurden zwei Kategorien von Verbindungen zwischen Produktelementen und deren Eigenschaften und Merkmalen beschrieben. Zum einen die Ableitungen. Sie dienen der Differenzierung und der Rückverfolgbarkeit von Anforderungen, und zum anderen die Cross Links. Letztere bilden die notwendige Voraussetzung für das funktionale Zusammenspiel der Produktelemente. Neben diesen beiden Arten von Verbindungen spielen noch zwei weitere Mechanismen eine wichtige Rolle, um Beziehungen zwischen Produktelementen aber auch zwischen Produktelementen und der Umwelt zu beschreiben. Dies sind *Abhängigkeiten* (Definition 24, Seite 87) und *Randbedingungen* (Definition 16, Seite 52).

---

60 zum Beispiel technische Stromrichtung von Plus nach Minus

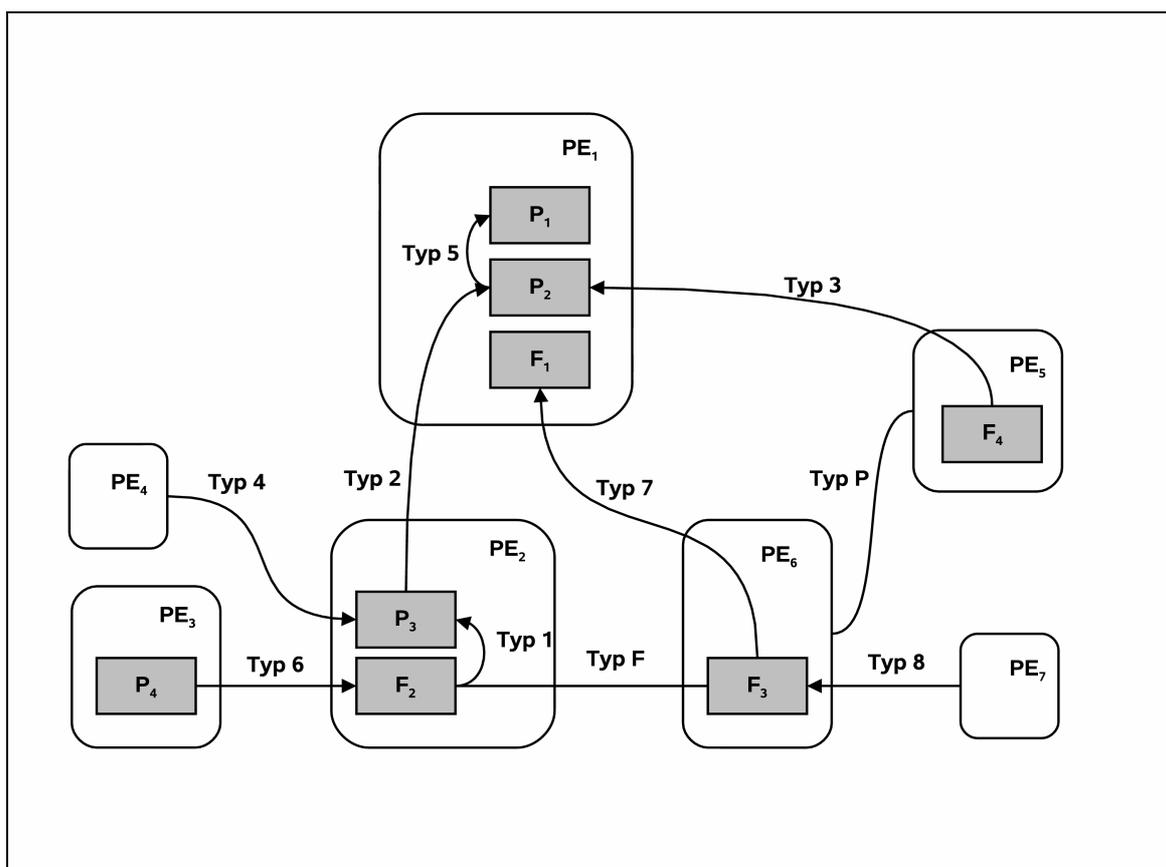


Abbildung 26: Strukturelle Darstellung der Produkt-DNA (schematisch)

### Definition 24: Abhängigkeit

Eine Abhängigkeit (DP) beschreibt die Wechselwirkung zwischen Eigenschaften oder Merkmalen. Es wird zwischen mathematischen und nicht-mathematischen Abhängigkeiten unterschieden.

Eine mathematische Abhängigkeit lässt sich mittels mathematischer Formeln beschreiben. Die Formeln können von einem oder mehreren Parametern abhängen. Sie können weiterhin linear oder nicht linear und außerdem unter- oder auch überbestimmt sein. Ein einfaches Beispiel: „ $n_G = n_M * i_G$ “, das heißt die Drehzahl am Getriebeausgang ( $n_G$ ) ist das Produkt aus Getriebeeingangsdrehzahl ( $n_M$ ) und Übersetzungsverhältnis ( $i_G$ ).

Nicht-mathematische Abhängigkeiten zeigen Beziehungen an, die sich zwar nicht durch Formeln ausdrücken lassen, jedoch empirisch vorhanden sind. Sie geben Auskunft über die Änderungsrichtung der abhängigen Größe. Beispiel: „Das Innenraumgeräusch erhöht sich, wenn die Dichte der Gummimischung der Reifen erhöht wird.“

Abhängigkeiten sind nicht zu verwechseln mit Randbedingungen (Definition 16, Seite 52). Während Randbedingungen den Zulässigkeitsraum von Produktanforderungen einschränken, dienen Abhängigkeiten ausschließlich dazu, mathematische oder nicht-mathematische Beziehungen zwischen Eigenschaften oder Merkmalen von Anforderungen anzuzeigen. Oder vereinfacht gesagt, beschreiben Randbedingungen jene Bedingungen, unter denen ein bestimmtes Produktelement existiert oder zum Einsatz kommt, wie zum Beispiel „nur in Kombination mit einem 1,8 l Motor“, „auf regennasser Fahrbahn“, „nicht für den asiatischen Markt“. Sie schränken den Lösungsraum ein und beeinflussen somit direkt die Produktauslegung. Dem gegenüber beschreiben Abhängigkeiten die Wechselwirkung zwischen Eigenschaften oder zwischen Merkmalen und damit mehr oder minder das Betriebsverhalten.

Das vorliegende Modell berücksichtigt Abhängigkeiten, jedoch soll dieses Thema im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht weiter vertieft, sondern auf die Arbeit von JÖRG verwiesen werden. Er hat darin am Beispiel einer Brennraumoptimierung die Problematik besagter Abhängigkeiten ausführlich besprochen. Schon dieser „relativ kleine“ Anwendungsfall stellt sich bezogen auf den Umfang der mathematischen Gleichungen, die zur Beschreibung eines Fahrzeugs notwendig wären, als äußerst komplex heraus [Joer-05, Seite 160 f.]. Die mathematische Beschreibung von Abhängigkeiten ist Gegenstand der „Technischen Simulation“ und soll im Rahmen des „Anforderungsmanagements“ nicht weiter vertieft werden.

Nachdem nun auch der Begriff Abhängigkeit definiert wurde, kann ein Gesamtbild aller Beziehungsarten im Modell aufgezeigt werden (Abbildung 27). Die Ableitungen beschreiben die vertikalen und die Cross Links die horizontalen Beziehungen. Abhängigkeiten sind zur Beschreibung mathematischer und nicht-mathematischer Zusammenhänge gedacht. Randbedingungen schränken den Zulässigkeitsraum von Produktanforderungen ein. Sie können aber auch als Beziehungen interpretiert werden. Sie treten als Bestandteile der Anforderungselemente P, F und pe auf, stehen hierbei aber immer im Bezug auf das Produktelement (PE) der Produktanforderung. Sie selbst wiederum stehen oftmals in Beziehung zu anderen Produktelementen und Nicht-Produktelementen oder deren Eigenschaften und Merkmalen.

Abschließend eine kurze Zusammenfassung dieses Unterkapitels. Es wurde ein Evolutionsmodell aufgebaut. Kern des Modells bildet die Produkt-DNA. Diese besteht aus den normalisierten Anforderungen und der vertikalen oder horizontalen Vernetzung. Die vertikale Vernetzung bildet das Rückrad, wenn es um den Aufbau der Produkt-DNA geht. Sie stellt die Rückverfolgbarkeit der Produktanforderungen sicher und kommt durch Ableitungen zustande. Die horizontale Vernetzung stellt die Verbindung der Produktelemente an den Schnittstellen sicher und wird durch sogenannte Cross Links beschrieben. Hinsichtlich der der Ableitungen wurde zwischen acht verschiedenen Typen unterschieden, die alle auf drei Prinzipien basieren: der Normalisierung, der Transformation und der Distribution.

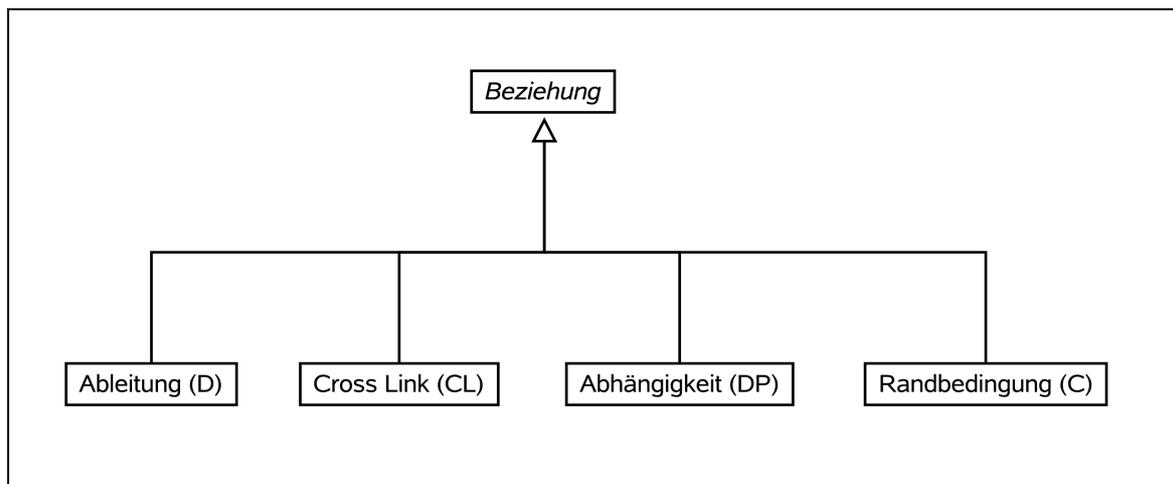


Abbildung 27: Vier Arten von Beziehungen

Es wurde der Begriff der Abhängigkeit eingeführt. Abhängigkeiten beschreiben das meist mathematische aber auch manchmal nicht-mathematische Zusammenspiel von Eigenschaften oder Merkmalen.

Die Produktevolution ist ein Prozess, in dessen Verlauf eine Produkt-DNA erstellt wird (Abbildung 28). Diese besteht aus den Elementen der normalisierten Produktanforderungen<sup>61</sup> und ihrer Beziehungen. Beim erstmaligen Aufbau einer Produkt-DNA (Initiale Produkt-DNA) entsteht diese nach dem linken Ast des V-Modells und folgt der Theorie nach einem Top-down-Ansatz.

<sup>61</sup> Ausgenommen ist die Gewichtung, welche, wie man später noch sehen wird, als Attribute von Produktelementen, Eigenschaften und Merkmalen realisiert wird.

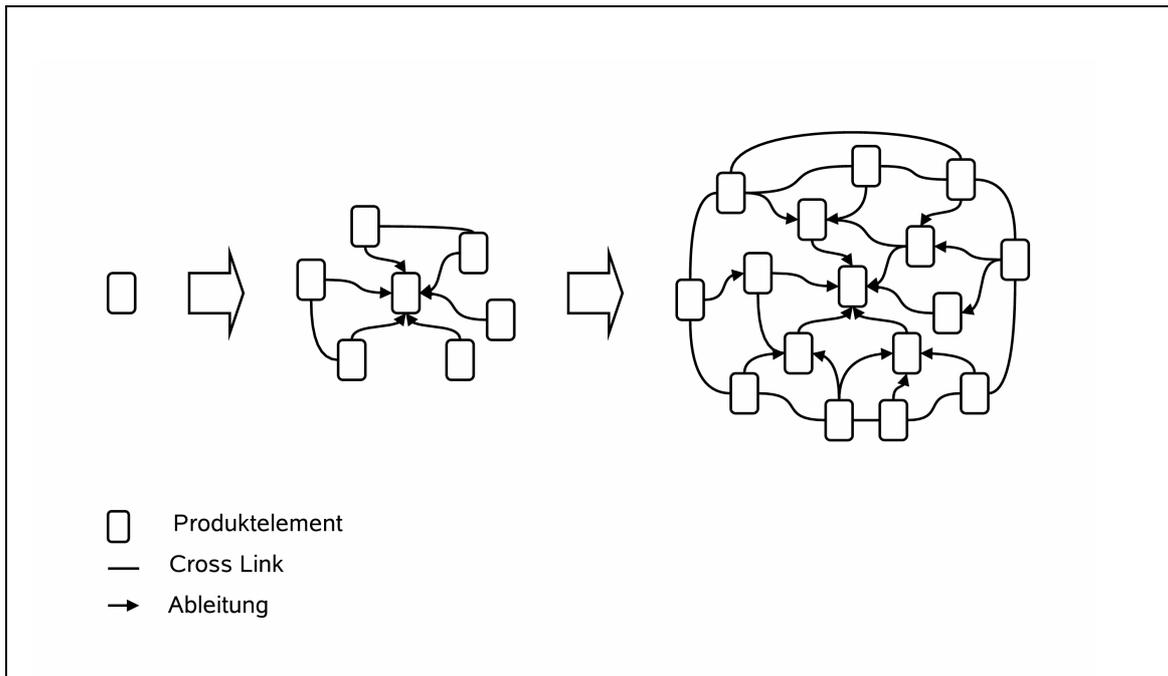


Abbildung 28: Zeitliche Darstellung der Produktevolution (schematisch)

### 3.3.3 Produktwachstum (ideal)

Betrachtet man die Zeiträume der Evolution und des Wachstums in der Natur, so nimmt das Individualwachstum im Verhältnis zum stammesgeschichtlichen Wachstum einen nahezu vernachlässigbaren Zeitraum ein. Die Entstehung der ersten Lebensform bis zu den heutigen höheren Lebewesen dauerte ca. 4,5 Milliarden Jahre. Im Vergleich dazu ist das Lebensalter von Menschen nahezu vernachlässigbar<sup>62</sup>. Ein Ergebnis aus Jahrmillionen Evolution ist die komplexe DNA höherer Lebewesen.

Das Ergebnis aus 112 Jahren Automobilbau sind die Fahrzeuge, wie man sie heute täglich auf den Straßen vorfindet. Zwar gibt es für diese auch einen (generischen) Bauplan, aber dieser liegt, wie zu Beginn dieser Arbeit schon ausgeführt, derzeit nicht in einer Art Produkt-DNA vor. Würde es jedoch eine Produkt-DNA wie in Kapitel 3 beschrieben geben, so wären auch 112 Jahre Automobilentwicklung in der Produkt-DNA enthalten.

<sup>62</sup> Die prognostizierte Lebenserwartung von neugeborenen Jungen liegt bei 76 Jahren und die von neugeborenen Mädchen bei 82 Jahren in Deutschland. Quelle: Statistisches Bundesamt, 2004

Im Rahmen eines Fahrzeugprojektes wäre die Produkt-DNA auch gleichzeitig die vollständige<sup>63</sup> Spezifikation des Produktes. Ist diese vorhanden, können die Komponenten des Fahrzeugs nach den technischen Angaben konstruiert werden. Das Produkt beginnt zu „wachsen“.

**Definition 25:** Produktwachstum

Produktwachstum ist die Implementierung von Eigenschaften und Merkmalen über die technische Realisierung der Produktelemente während des Produktentwicklungsprozesses.

Bezogen auf die Fahrzeugentwicklung oder das V-Modell (Abbildung 4, Seite 12) bedeutet dies, dass das Produktwachstum die Unterprozesse *Konstruktion* und *Prüfung* des Produktes abdeckt. Aus Anforderungsmanagement-Sicht ist die Art und Weise, wie etwas technisch umgesetzt wird, weniger von Interesse. Viel wichtiger sind die Teil- und Endergebnisse aus den Produktprüfungen, denn diese sind notwendig zur Verifizierung und Validierung der Produktbestandteile und letztendlich des Gesamtproduktes.

Die Produktevolution folgt im Wesentlichen einem Top-down-Ansatz, das heißt, das Fahrzeug wird von Fahrzeugebene über die Systemebene bis auf Komponentenebene und gegebenenfalls auf Teileebene spezifiziert. Dies entspricht dem linken Ast des V-Modells.

Es wird nun angenommen, dass alle PEs, Ps, Fs und Beziehungen vorliegen. Damit ist die Produkt-DNA für ein Projekt vollständig, und es folgt die Konstruktion der Bauteile. In der Produkt-DNA sind dies die Blätter des Baumes.

Nach der Konstruktion werden die Produktbestandteile verifiziert und validiert. Die Teile müssen nicht zwingend physisch existieren. Je nach Art der Produktbestandteile und der Vertrauenswürdigkeit der eingesetzten IT-Simulationswerkzeuge kann die Prüfung auch digital erfolgen. Die Validierung stützt sich dabei auf die Simulation beziehungsweise deren Algorithmen.

Gemäß dem rechten Ast des V-Modells folgt anschließend die Integration der Teile auf der nächst höheren Ebene. Dazu werden die jeweils komplementären Schnittstellen miteinander verbunden.

---

<sup>63</sup> Vollständig an dieser Stelle bedeutet nicht, dass alle Eigenschaften, Merkmale und Beziehungen erfasst sind, jedoch gerade so viele, wie für die Produktentwicklung unter gegebenen Rahmenbedingungen notwendig sind.

Findet die Integration physisch statt, so werden die Komponenten an den entsprechenden Schnittstellen physikalisch miteinander gekoppelt. Findet sie im Digital Mock-Up (DMU) <sup>64</sup> statt, kann die Simulationssoftware die Schnittstellen über Cross Links verbinden und so die Verifizierung vornehmen.

Cross Links vom Typ F lassen quantitative Aussagen über die Funktion der Schnittstellen zu. Cross Links vom Typ P hingegen beschränken sich nur auf binäre Aussagen und zwar, ob die entsprechenden Schnittstellen miteinander gekoppelt sind oder nicht.

Für das Projektmanagement ist der Zustand des Produktes sowohl für die Planung als auch für die Projektverfolgung wichtig. Die Entwicklungszustände der einzelnen Bestandteile geben Auskunft über den Reifegrad des Produktes. Die Produktbestandteile selbst werden, zumindest in der frühen Phase der Produktentwicklung, über Produkthanforderungen definiert. Da der Grad der Umsetzung von Produkthanforderungen über den Reifegrad des Produktes Auskunft gibt, müssen diese zustandsbehaftet sein. Betrachtet man die normalisierten Produkthanforderungen genauer und lässt die Gewichtung außen vor, so kann man feststellen, dass die Elemente P, F und pe die unabhängigen Größen in einer Produkthanforderung bilden, während PE das abhängige Element bildet. Folglich sind die unabhängigen Elemente zustandsbehaftet. Die Zustände der Eigenschaften, Merkmale oder der untergeordneten Produktelemente definieren den Zustand eines Produktelements und letztendlich auch des Produktes. Diese Betrachtungsweise erlaubt die Planung und Überwachung des Entwicklungsfortschritts von der Definitionsphase bis hin zur Serienfertigung.

Es wird im Folgenden ein praktischer Vorschlag für die Zustände der Eigenschaften, Merkmale und Produktelemente unterbreitet (Tabelle 4):

---

<sup>64</sup> Es darf angenommen werden, dass in naher Zukunft neben dem statischen und dynamischen DMUs auch verstärkt funktionale DMUs zu Einsatz kommen werden.

<b>Zustände von P, F, pe</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>anwendbar auf</b>
initialized	erfasst, das heißt, P / F / pe sind angelegt	P / F / pe
proposed	Zielwert und das zulässige Intervall liegen vor.	P und F
balanced	gegenüber anderen Anforderungen abgestimmt („balanciert“) und ggf. korrigiert	P / F / pe
approved	verabschiedet; darf technisch umgesetzt werden	P und F
	verabschiedet; darf eingesetzt werden	pe
verified	„Ist-Wert“ gegen „Soll-Wert“ geprüft	P und F
validated	Ergebnis für gültig erklärt	P und F
released	für die Serienfertigung freigegeben	pe

Tabelle 4: Basiszustände zu P, F, pe (Vorschlag)

Die Zustände in Tabelle 4 sollen als Basiszustände bezeichnet werden. Weitere Zustände bzw. Unterzustände sind im Rahmen eines Fahrzeugprojektes möglich - meist abhängig vom Zweck innerhalb der Abteilungen. Beispielsweise könnte der Einkauf zur Lieferantenauswahl die Unterzustände *quotation requested*, *quotation reviewed* und *supplier nominated* einführen.

Wie auch schon aus der Tabelle ersichtlich, lassen sich die Zustände nicht auf alle Anforderungselemente gleichermaßen anwenden. So werden in der Praxis Eigenschaften und Merkmale bzw. Funktionen validiert. Demgegenüber spricht man bei Produktelementen von einer Freigabe („released“). Die Zustände lassen sich auch auf nicht-technische Eigenschaften und Merkmale anwenden, auch wenn dies heute

nicht üblich ist. So kann man sich beispielsweise vorstellen, dass man auch bei Produktkosten von Zuständen wie „verified“ oder „validated“ spricht. Schließlich müssen auch die geplanten Kosten den Ausgaben gegenübergestellt werden.

Die Zustände in Tabelle 4 zielen auf unterschiedliche Größen ab: Die oberen vier gehören zur Produktdefinition und zielen somit auf die „Soll-Größen“ ab. Die letzten drei gehören zur Produktrealisierung bzw. Integration zielen auf die „Ist-Größen“ ab.

Der Vollständigkeit wegen soll auf weitere, zwar nicht Anforderungen betreffende, jedoch für den Produktentwicklungsprozess wichtige Zustände kurz eingegangen werden.

Neben der Planung ist eine der Kernaufgaben des Projektmanagements die Fortschrittskontrolle innerhalb des Projektes. Der Projektfortschritt kann grundsätzlich an zwei Prozesselementen festgemacht bzw. gemessen werden. Das sind zum einen die Aktivitäten<sup>65</sup>, welche Auskunft über zeitlichen Fortschritt des Projektes geben; zum anderen die Teil- oder Endergebnisse<sup>66</sup> aus den Aktivitäten. Die im Rahmen des Produkthanforderungsmanagements wichtigen Teil- oder Endergebnisse sind solche, die das Produkt betreffen. Während bei den Aktivitäten der zeitliche Fortschritt im Vordergrund steht, ist es beim Produkt der Reifegrad. Sowohl die Aktivitäten als auch das Produkt und dessen Bestandteile werden diskret gemessen, das heißt über Zustände. Die Beschreibungen der Basiszustände von Aktivitäten werden hier nur kurz aufgeführt (Tabelle 5).

<b>Zustand der Aktivität</b>	<b>Beschreibung</b>
waiting	Die Aktivität wurde erfasst, jedoch noch nicht gestartet
processing	Die Aktivität ist in Bearbeitung; eventuell liegen Teilergebnisse vor
finished	Die Aktivität ist abgeschlossen und Endergebnisse liegen vor
on hold	Die Aktivität wurde auf Grund von unvorhergesehenen Ereignissen angehalten und wird gegebenenfalls zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt

*Tabelle 5: Basiszustände der Vorgänge (Vorschlag)*

<sup>65</sup> oder auch „Vorgänge“ genannt. Auf hoher Projektmanagement Ebene können dies auch Subprozesse des Fahrzeugentwicklungsprozesses sein.

<sup>66</sup> im amerikanischen Sprachgebrauch auch „Deliverables“ genannt.

Zwei Fragen, die sich bezüglich der Zustände sicher ergeben, sind: Wer erzeugt diese Zustände, und wann werden sie im Prozess erreicht?

Die erste Frage zielt auf die Organisationsstruktur und die Rollen der Personen ab. Es macht an dieser Stelle keinen Sinn, Organisationsstrukturen oder Rollen aufzuzeigen, da sich diese von Unternehmen zu Unternehmen unterscheiden. Jedoch können prinzipiell zwei Organisationsformen beteiligt sein:

Dies ist zum einen die Linienorganisation, welche funktional ausgerichtet und hinsichtlich der Erfassung der Produkthanforderungen durch die Fachbereiche vertreten ist; zum anderen die Projektorganisation, die aus Vertretern der Fachbereiche zusammengesetzt, für die Projektkoordination zuständig ist und die Projektleitung verantwortet. Es gilt grundsätzlich, dass die Verantwortung für den Inhalt der Produkthanforderung in Fachbereichen der Linienorganisation liegt. Die Koordination und die Überwachung liegt in der Verantwortung der Projektorganisation. Das heißt, die Zustände werden in Absprache mit den Fachbereichen von der Projektorganisation, genauer gesagt von der Projektleitung, gesetzt.

Auch die Anforderungselemente RD und TP sind zustandsbehaftet. Anforderungsdokumente und Prüfvorschriften, unabhängig ob unternehmensintern oder unternehmensextern, unterliegen Entstehungs- oder Änderungsprozessen. Sie durchwandern dabei mindestens die drei Zustände *initialized*, *draft* und *approved* (Tabelle 6). Weitere Zustände oder auch Unterzustände können je nach Anzahl der Prozessschritte, Umfang der Spezifikationen oder Prüfvorschriften und Anzahl der beteiligten Gremien hinzukommen.

Weiterhin unterliegen Spezifikationen und Prüfvorschriften dem Änderungs- und in diesem Zusammenhang auch dem Versionsmanagement.

<b>Zustand der Spezifikation oder Prüfvorschrift</b>	<b>Beschreibung</b>
initialized	Die Spezifikation oder Prüfvorschrift wurde zur erstmaligen Erstellung oder zur Änderung registriert.
draft	Ein Entwurf für die künftige Version der Spezifikation oder Prüfvorschrift liegt vor.
approved	Die Spezifikation oder Prüfvorschrift wurde genehmigt und erhält eine Versionsnummer.

Tabelle 6: Basiszustände der Spezifikationen oder Prüfvorschriften (Vorschlag)

Zurück zum Produktwachstum. Für das ideale Produktwachstum wird angenommen, dass die Produkt-DNA vollständig vorliegt. Sie bildet die Grundlage für die Konstruktion oder den Einkauf, sofern die Komponenten von Zulieferern entwickelt oder einfach gekauft werden.

Bezüglich der vertikalen Vernetzung gemäß den Ableitungen bildet die Produkt-DNA eine Baustruktur aus. Die äußersten Produktelemente, das heißt die Blätter des Baumes, werden als erstes realisiert. Danach folgt die Integration durch Ausprägung der horizontalen Vernetzung (das heißt Verbindung der Schnittstellen) und der Überprüfung der nächst höheren Produktelemente bis hin zur Wurzel des Baumes. Das Produkt wächst somit, bezogen auf die Produkt-DNA, von „außen nach innen“. Dieser Sachverhalt ist schematisch in Abbildung 29 dargestellt, wobei aus Vereinfachungsgründen die Ableitungspfeile nur auf die Produktelemente zeigen.

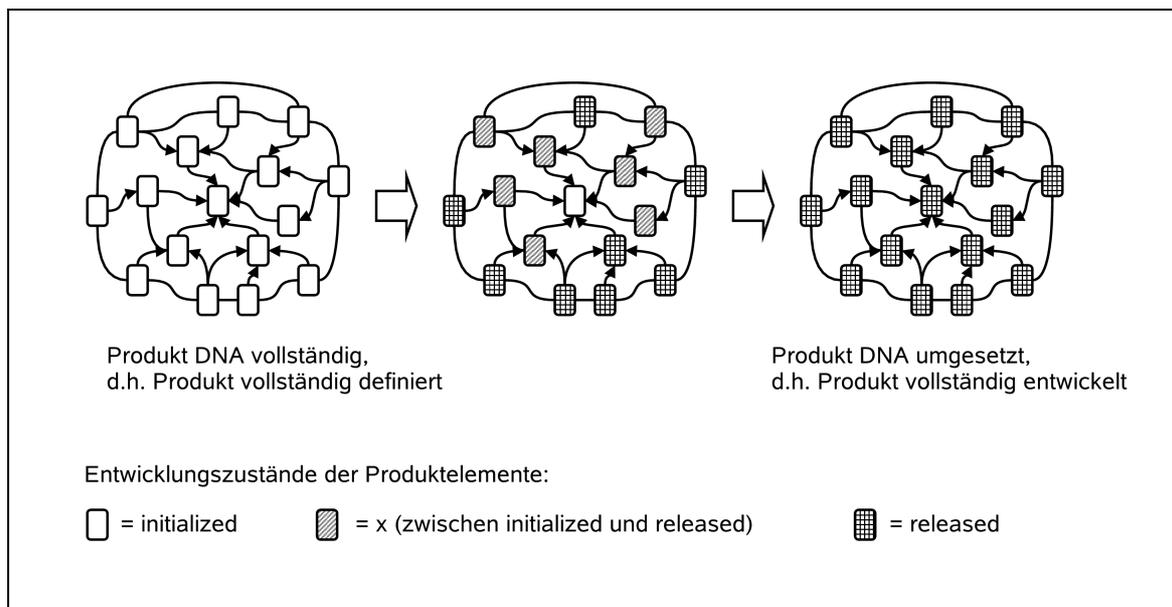


Abbildung 29: Fortschritt des Produktwachstums über Zustände (schematisch)

Gegenstand dieses Unterkapitels war das Produktwachstum, definiert als die Implementierung von Eigenschaften und Merkmalen über die technische Realisierung der Produktelemente. Das Produktwachstum, wie es hier beschrieben wurde, kann ideal angesehen werden, da als Voraussetzung eine vollständige Anforderungsbeschreibung des Produktes vorhanden sein muss, was in der Fahrzeugentwicklung nicht der Fall ist. Der Grad der Reife spiegelt sich in der Umsetzung der Eigenschaften und Merkmale. Um den Grad objektivieren zu können, wurden die Eigenschaften, Merkmale und Produktelemente mit Zuständen versehen. Es wurden weiterhin Vorschläge für diverse Basiszustände unterbreitet.

### 3.3.4 Überlagerung Produktevolution und Produktwachstum (real)

In den Kapiteln 3.3.2 und 3.3.3 wurden die Mechanismen der Produktevolution und des Produktwachstums aufgezeigt. Beide sind rein theoretisch. In einem Fahrzeugprojekt wird es in der Realität nicht vorkommen, dass zuerst das komplette Lastenheft (entspricht der Produkt-DNA) erstellt und danach erst mit der Konstruktion der Produktbestandteile begonnen wird. In der heutigen Fahrzeugentwicklung wird zum Teil schon 12 bis 18 Monate vor dem Abschluss des technischen Lastenhefts, mit der Konstruktion und Erprobung von Produktbestandteilen begonnen. Gründe hierfür gibt es mehrere. So zum Beispiel, dass neue Motoren erst mit der zweiten Karosserievariante eines Fahrzeugprogramms oder zum Modelljahreswechsel verbaut werden. Es werden existierende Serienfahrzeuge des Vorgängerprojektes oder eines „ähnlichen“ Projektes für die Motorenerprobung umgebaut, noch bevor das Lastenheft für das neue Projekt vollständig erstellt ist.

Ein weiterer Grund sind die Systeme und Komponenten mit langer Entwicklungsdauer<sup>67</sup>. Es muss zu einem sehr frühen Zeitpunkt mit der Konstruktion und Erprobung begonnen werden, um den Start der Serienproduktion nicht zu gefährden. Mit der Konstruktion muss schon begonnen werden, noch bevor die Gesamtfahrzeugspezifikation und folglich auch die abhängigen Spezifikationen vollständig sind. Besonders kostenkritisch ist dieser Sachverhalt bei der Einbindung von Zulieferern. Unvollständige Spezifikationen führen unweigerlich zu nachträglichen Änderungen und folglich zu zusätzlichen Kosten.

Die Erstellung der Spezifikationen für das Fahrzeug, die Systeme und die Komponenten beansprucht in heutigen Fahrzeugentwicklungsprozessen immer noch verhältnismäßig viel Zeit in Relation zur Gesamtentwicklungsdauer des Fahrzeugs. Parallel hierzu müssen schon Anpassungskonstruktionen an existierenden technischen Lösungen vorgenommen und erprobt werden. Auch bereits fertige technische Lösungen, welche ohne Änderungen in das künftige Produkt integriert werden sollen, müssen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit geprüft werden. Um es auf den Punkt zu bringen: Das bisherige Anforderungsmodell, angewandt auf die Realität, führt zu einer Überlagerung aus Produktevolution und Produktwachstum. In Abbildung 30 ist die Entwicklung des Produktes schematisch dargestellt, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit die Ableitungspfeile nur auf die Produktelemente zeigen.

---

<sup>67</sup> sogenannte „long lead items“

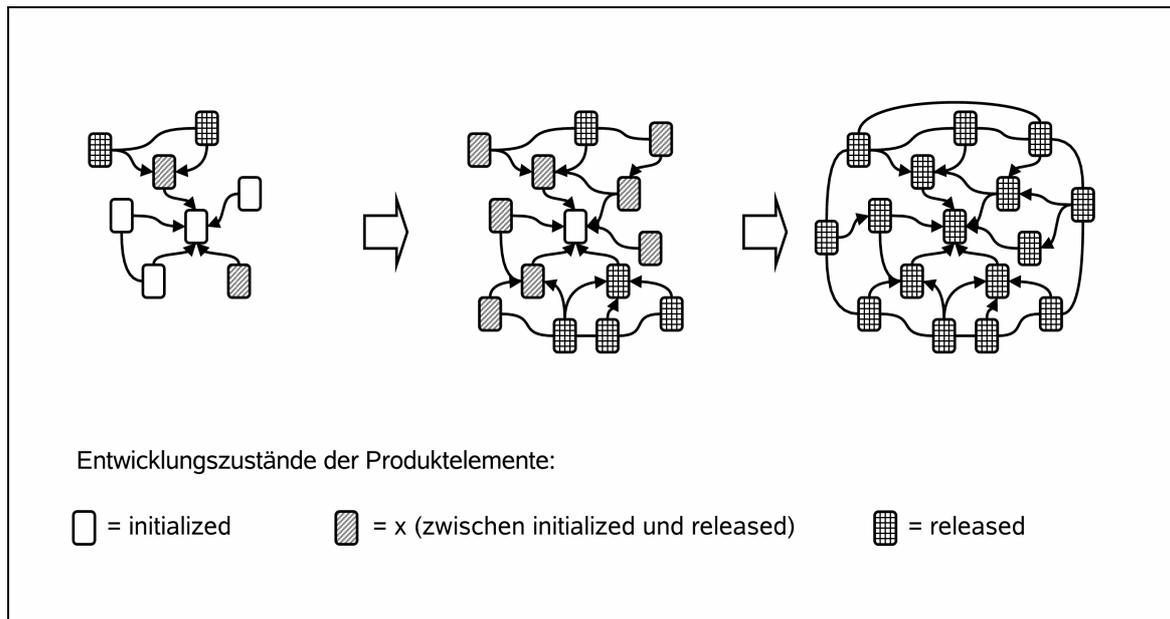


Abbildung 30: Überlagerung von Produktevolution und Produktwachstum (schematisch)

Die Überlagerung von Produktevolution und Produktwachstum bedeutet, dass neben der Komplexität durch die Vielzahl der PEs, Ps, Fs und deren Vernetzung über Ds und CLs eine weitere Komplexitätsdimension hinzukommt: Die Dynamik, hervorgerufen durch die Änderungen der Produkt-DNA. Änderungen verursachen Verwaltungsaufwand.

Bis zu dieser Stelle wurden die Produktevolution und das Produktwachstum beschrieben und auch der notwendige Träger der Information. Durch den Menschen werden im Laufe des Fahrzeugprojekts die Änderungen an der Produkt-DNA und ihren Zuständen vorgenommen. Mit anderen Worten, eine reine Produkt-DNA verhält sich passiv. Den aktiven Beitrag liefert der Mensch. Von Vorteil wäre, wenn das Anforderungsmodell einen Beitrag zur Unterstützung des Menschen bei der Bewältigung der administrativen Tätigkeiten liefern könnte. Das Modell müsste über einen „aktiven Anteil“ verfügen.

**Definition 26:** Elementfunktion

Eine Elementfunktion (EF) ist eine Funktion zur Verarbeitung von produktinternen oder produktexternen Reizen auf Anforderungselemente aus der Menge {PE, P, F}.

**Definition 27:** Produktorganismus

Ein Produktorganismus setzt sich zusammen aus der Produkt-DNA sowie den Elementfunktionen.

Zu den beiden Definitionen einige Erläuterungen. Die Produkt-DNA für sich betrachtet, verhält sich passiv und beschreibt nur die Struktur des Produktes, das heißt, sie enthält alle Anforderungen an das Produkt und darüber hinaus noch die vertikale und horizontale Vernetzung der Anforderungselemente. Spätestens mit Einführung der Begriffe Produktorganismus und Elementfunktionen wird nun das „klassische“ Anforderungsmanagement verlassen. Die Elementfunktion erlauben es dem Produktorganismus teilweise selbst zu agieren.

Über die Elementfunktionen wird der Produktorganismus in die Lage versetzt, Reize wahrzunehmen und auf diese zu reagieren. Es soll hierbei zwischen externen und internen Reizen unterschieden werden. Externe Reize sind Reize, die von außen auf den Produktorganismus wirken. Sie stammen hauptsächlich von Menschen, aber auch von IT-Systemen (zum Beispiel: PDM-Systemen) her. Interne Reize sind Reize, die von Elementen innerhalb des Produktorganismus stammen. Reize können zu folgenden vier Reaktionen führen:

**Strukturmodifikationen**

Dies sind Modifikationen an der Produkt-DNA. Dazu zählen das Hinzufügen, Ändern und Löschen von Produktelementen, deren Eigenschaften, Merkmale oder Beziehungen.

**Werte-Änderungen**

Dazu zählen die Änderungen der Soll-/Ist-Werte und der Wertebereiche der Eigenschaften und Merkmale; daneben auch die Änderungen der Zustandsgrößen oder auch Änderungen administrativer Attribute, wie zum Beispiel Ansprechpartner.

## **Präsentation**

Diese Reaktion bewirkt die Darstellung des Produktorganismus, hauptsächlich der Produkt-DNA, gemäß definierter Vorschriften. Diese Vorschriften beschreiben in erster Linie Sichten<sup>68</sup> auf den Produktorganismus. Die Darstellungen können statischer oder dynamischer Art sein.

## **Benachrichtigungen**

Dies sind Nachrichten an Akteure, wie zum Beispiel an Mitarbeiter oder Simulationsprogramme.

Die Elementfunktionen werden den Anforderungselementen PE, P und F zugewiesen. Eine ihrer wichtigen Anwendungen ist zum Beispiel die Überprüfung der Existenzberechtigung der drei Anforderungselemente in Verbindung mit Abhängigkeiten und Randbedingungen. Welche Arten von Elementfunktionen es gibt und wie diese zur Anwendung kommen, wird noch eingehend in Kapitel 4.3 erörtert werden.

### **3.3.5 Zusammenfassung**

In Kapitel 3.3 wurde, mit Hilfe der Definitionen von Kapitel 3.1 und dem biologischen Exkurs in Kapitel 3.2, ein Anforderungsmodell erstellt. In Anlehnung an die Prozesse Evolution und Wachstum aus der Natur wurden die Begriffe Produkt-evolution und Produktwachstum eingeführt. Die Produktevolution beschreibt die Struktur des Produktes in unterschiedlicher Auflösung und über den gesamten Produktentwicklungsprozess hinweg. Sie zeichnet sich durch die Zunahme von Eigenschaften und Merkmalen des Produktes und seiner Bestandteile in Qualität und Umfang aus. Demgegenüber liegt der Fokus des Produktwachstums auf der Integration der Produktbestandteile und somit auf der Reife des Produktes. Produktwachstum ist die Implementierung von Eigenschaften und Merkmalen über die technische Realisierung der Produktelemente während des Produktentwicklungsprozesses. Beide Prozesse wurden zuerst ideal und getrennt voneinander betrachtet. Für das Anforderungsmodell wurden beide Prozesse überlagert, was ein realistischeres Modell der heutigen Produktentwicklung liefert.

In Anlehnung an die Natur wurde der Begriff der Produkt-DNA eingeführt. Als Menge aller Produktelemente, deren Eigenschaften und Merkmale sowie deren Beziehungen untereinander verkörpert die Produkt-DNA den „zentralen“ Ort für die Produktbeschreibung.

---

68 Englisch: Views

---

Die Produktevolution stützt sich auf drei Prinzipien der Anforderungserfassung: Die Überführung qualitativer Anforderungen in quantitative oder auch lösungsgebundene Anforderungen (Transformation), die Verteilung von Anforderungen eines Produktelementes auf untergeordnete Produktelemente (Distribution) sowie die Detaillierung bzw. Präzisierung von Produktanforderungen (Ableitung). Basierend auf diesen drei Prinzipien wurden acht Ableitungstypen unterschieden.

Neben den vertikalen Zusammenhängen (Ableitungen) zwischen Produktelementen bzw. Eigenschaften und Merkmalen wurden sogenannte Cross Links definiert. Sie repräsentieren Schnittstellenanforderungen und bilden die horizontale Vernetzung der Produktelemente untereinander.

### 3.4 Zusammenfassung

Das Konzept für ein Anforderungsmodell wurde über zwei Stufen entwickelt. Dabei wurden in Kapitel 3.1 die begrifflichen Grundlagen geschaffen sowie eine Notation und Syntax zur Beschreibung von Produkthanforderungen vorgeschlagen. In Kapitel 3.2 wurde auf der Suche nach Parallelen zwischen der Natur und der Produktentwicklung in Bereichen des Wachstums, der Evolution und der DNA ein Exkurs in die Biologie unternommen. Mit den dort festgelegten Definitionen und gewonnenen Erkenntnissen wurde anschließend in Kapitel 3.3 ein Entwurf für ein Anforderungsmodell entwickelt.

Bestimmte Termini aus der Welt des Anforderungsmanagements sind von einigen Autoren und über Normen schon definiert, mussten jedoch für die vorliegende Arbeit angepasst oder präzisiert werden. Dies betrifft die Begriffe Produkt, Produktentwicklung, Anforderung und Funktion.

Besonders hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang die Begriffe Eigenschaft und Merkmal. Die Erhebung einer Anforderung ist nur dann gerechtfertigt, wenn diese auch überprüft werden kann. Dieses Charakteristikum trennt die beiden Begriffe voneinander. Eigenschaften eines Produktes sind produktimmanent, können jedoch nur subjektiv beurteilt werden. Merkmale werden vom Menschen festgelegt und können, im Gegensatz zu den Eigenschaften, objektiv beurteilt werden.

Der Begriff des Produktelementes wurde neu eingeführt. Ein Produktelement ist der Platzhalter für eine (oder mehrere) technische Lösung(en) zu einer bestimmten Menge von Eigenschaften und Merkmalen.

In Verbindung mit den Begriffen Produktelement, Eigenschaft und Merkmal wurde die Menge aller möglichen Anforderungen im Entwicklungsprozess auf die Produkthanforderungen beschränkt. Eine Produkthanforderung ist eine Vorgabe von zu erfüllenden Eigenschaften und Merkmalen zu einem Produktelement oder die Vorgabe zur Verwendung vorhandener technischer Lösungen zu Produktelementen.

Um gewöhnliche Produkthanforderungen handhaben zu können, werden diese normalisiert. Bei diesem Vorgang werden sie in semantische Anteile bestehend aus Produktelementen, Gewichtung, Eigenschaften, Merkmale und auch untergeordnete Produktelemente zerlegt. Das Ergebnis sind normalisierte Produkthanforderungen, welche jeweils genau aus einem Produktelement, einer Gewichtung und einem der drei Anforderungselemente Eigenschaft, Merkmal oder untergeordnetes Produktelement bestehen. Es wurde hierbei die drei Anforderungsarten: Eigenschafts-, Merkmals- und Lösungsanforderung gebildet.

---

Da manche Produkthanforderungen in eigenständigen, meist externen Dokumenten (zum Beispiel: Gesetzesvorschriften) vorkommen und nicht im Zuständigkeitsbereich des Unternehmens liegen, wurde ein Spezialfall für Merkmalsanforderungen definiert. In der sogenannten referenzierenden Merkmalsanforderung wird an Stelle des Merkmals auf die Vorschrift, in dem das Merkmal festgelegt wurde, verwiesen.

Alle vier Arten von Produkthanforderungen sind messbar, die Eigenschaftsanforderung allerdings nur subjektiv.

Produkthanforderungen sind jeweils mit einer Gewichtung versehen. In einer Tabelle, in der die Produkthanforderungsart gegenüber dem durch die Gewichtung definierten Produkthanforderungstyp aufgetragen ist, wurde ein Vorschlag für die Notwendigkeit der Umsetzung unterbreitet.

Produkthanforderungen unterliegen sehr oft Randbedingungen, gemeint sind Einschränkungen der Eigenschaften, Merkmale oder existierenden Lösungen.



## 4 Methodik

### 4.1 Einleitung

Dieses Kapitel behandelt die Umsetzung des Anforderungsmodells. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem Aufbau der Initialen Produkt-DNA ( Kapitel 4.2 ), um später den sogenannten Produktorganismus erzeugen zu können, der die Mitarbeiter im Anforderungsmanagement unterstützt. Damit dies möglich ist, muss der Produktorganismus Funktionen bereitstellen (Abbildung 31). Dazu werden im Kapitel 4.3 vertiefende Überlegungen hinsichtlich der Elementfunktionen angestellt. Beide Kapitel werden mit Beispielen aus der Praxis untermauert.

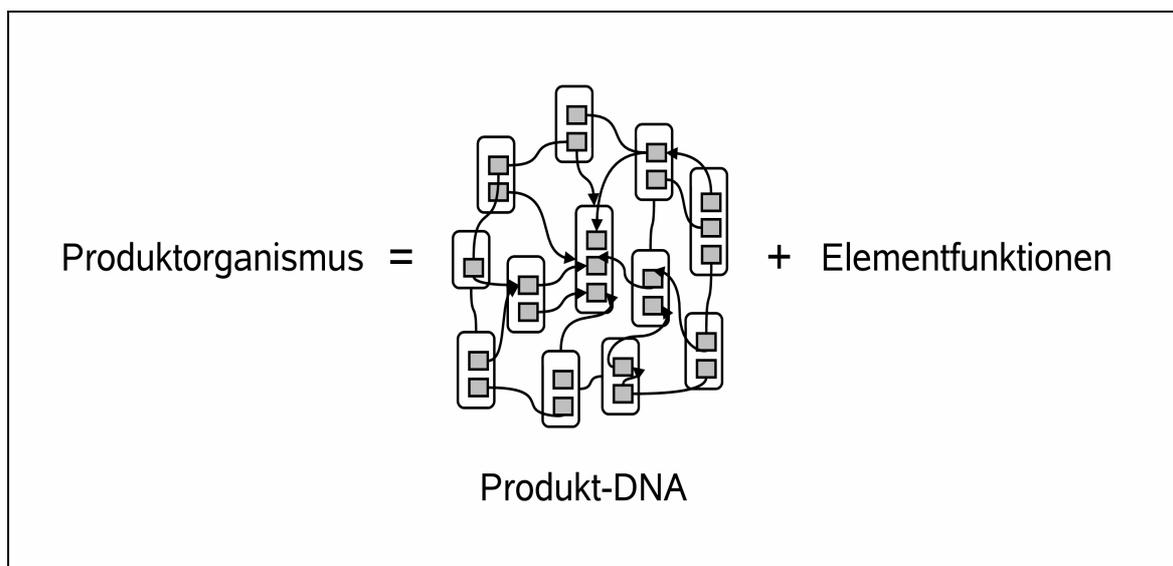


Abbildung 31: Produktorganismus (schematisch)

### 4.2 Initiale Produkt-DNA

In diesem Kapitel wird die prinzipielle Vorgehensweise für die erstmalige Erstellung einer Produkt-DNA beschrieben. Dafür gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

Die erste Vorgehensweise ist, ein schon abgeschlossenes Fahrzeugprojekt heranzuziehen. Der Vorteil hierbei liegt darin, dass weitgehend alle Produkthanforderungen vorliegen und diese thematisch gruppiert und entsprechend gebündelt bearbeitet werden können. Bei der Analyse dieser Daten können auch systematische Schwächen des Projektes erkannt und diese in künftigen Projekten vermieden werden. Nachteil ist, dass die Produkthanforderungen und alle dazugehörenden Informationen meist über die gesamte Organisation verteilt vorliegen und es einen erheblichen Aufwand bedeutet, diese einzusammeln und in Beziehung zu setzen, um sie dann für den Aufbau der Produkt-DNA heranzuziehen.

Die zweite Vorgehensweise ist, in einem neuen Projekt von Anfang an die Produkthanforderungen im Sinne des in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Anforderungsmodell zu erstellen. Vorteil ist, dass die Daten innerhalb des Projektes von Beginn an in der Produkt-DNA, das heißt an nur einer Stelle gehalten werden. Nachteil ist, dass auf Grund nicht vorliegender Erfahrung im Aufbau einer Produkt-DNA für das Projekt ein erhöhtes Risiko besteht.

Die Lösung liegt vermutlich zwischen den beiden Ansätzen: In einem neuen, möglichst kleinen und risikoarmen Projekt die Produkt-DNA parallel zu den vorhandenen Anforderungsspezifikationen zu erstellen.

Unabhängig davon bedarf es der Einrichtung eines Organisationsbereichs Anforderungsmanagement, geeigneter IT-Werkzeuge für die Entwicklung des Prototyps sowie der aktiven Unterstützung von Seiten des oberen Managements, diese neue Vorgehensweise zu erproben und entsprechende Ressourcen bereitzustellen.

### 4.2.1 Erfassung von Anforderungen

Jede Produkthanforderung durchläuft mehrere Prozessschritte bis sie letztendlich in die Produkt-DNA einfließen kann.

Im ersten Schritt wird eine Produkthanforderung in einer für den Menschen verständlichen Weise niedergeschrieben. Die Produkthanforderungen sollten unter Beachtung von nachfolgender Richtlinie aufgestellt werden<sup>69</sup>.

Produkthanforderungen ...

- müssen verständlich, eindeutig, kurz und prägnant sein
- sollen in Sätze gefasst sein

---

<sup>69</sup> siehe auch siehe auch [Tele, Seite 3 ff.]. Darüber hinaus findet man in [Eber-05, Seite 123 ff.] eine „Checkliste für Anforderungsspezifikationen“ die ähnliche Kriterien enthält: Klarheit, Relevanz, Vollständigkeit, Konsistenz und Verfolgbarkeit.

- müssen die Anforderungselemente PE, I und P, F oder pe enthalten
- müssen verifizierbar sein, das heißt die Prüfvorschrift(en) müssen beigefügt sein
- sollen so früh wie möglich im Entwicklungsprozess erfasst werden
- sollen hinsichtlich ihrer Notwendigkeit hinterfragt werden
- sollen möglichst von der Fahrzeugebene in Richtung Komponenten-/Teileebene erfasst werden und
- können um Sekundärinformationen ergänzt werden

Produktanforderungen müssen nicht zwingend als Sätze vorliegen, sondern zum Beispiel auch in Form von Tabellen. Wichtig ist hierbei nur, dass alle drei semantischen Anteile gemäß einer normalisierten Produkthanforderung (Definition 12, Seite 45) enthalten sind. So ist auch zum Beispiel der Satz „Der Ölstand darf nicht unter 2 l sinken“ keine Anforderung, da das Anforderungselement PE fehlt.

Produktanforderungen sollen verständlich sein. Damit dies gegeben ist, dürfen nur Begriffe aus der entsprechenden Domäne (hier: Automobilindustrie) genommen werden. Weiterhin sollen keine Abkürzungen verwendet werden und falls doch, so müssen diese erklärt sein<sup>70</sup>. Verschachtelungen in Sätzen sind nicht erlaubt. Produkthanforderungen müssen eindeutig sein, um Mehrdeutigkeiten der natürlichen Sprache auszuschließen.

Produktanforderungen müssen verifizierbar sein. Anforderungen, die weder subjektiv noch objektiv verifizierbar sind, dürfen nicht erfasst werden. Verifizierbar bedeutet auch, dass die entsprechenden Prüfvorschriften existieren und verfügbar sind. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, direkt bei der Erfassung der Produkthanforderungen, auf die Angabe von Prüfvorschriften zu bestehen. Einerseits wird hierbei das Bewusstsein für den damit verbundenen Prüfaufwand geschärft und andererseits wird sichergestellt, dass die Aktualität der Prüfvorschrift überprüft wird. Gerade bei gesetzlichen Vorschriften können bei der Erfassung einer bestimmten Produkthanforderung zwischen zwei Projekten unter Umständen mehrere Jahre liegen, in denen der Gesetzgeber Grenzwerte oder ähnliches ändert. Des Weiteren bleibt, sollte die Prüfvorschrift fehlen, bis zur Produktverifizierung meist noch genügend Zeit, um sie zu beschaffen oder zu erstellen. Dies gilt besonders bei der Erschließung neuer Märkte.

---

<sup>70</sup> zur Präsentation der Anforderungselemente seinen Abkürzungen erlaubt, jedoch nur, wenn zwischen einer Abkürzung und dem dazugehörigen Klartext eine 1:1 Beziehung besteht und die Abkürzungen Mehrdeutigkeiten ausschließen

Eine Prüfvorschrift in jedem Fall einzufordern macht jedoch nicht immer Sinn. Bei der Verifizierung des Crash-Verhaltens des Fahrzeuges müssen Prüfvorschriften angegeben werden, weil es sich hierbei um komplexe Prüfungen handelt. Bei der Produkthanforderung an die Glasdicke einer Seitenscheibe genügt es, anzugeben, dass diese mit einer Schieblehre zu messen ist.

Alle Informationen, die nicht direkt zum Aufbau der Produkt-DNA beitragen, aber für den Entwicklungsprozess notwendig sind, seien hier als *Sekundärinformationen* bezeichnet. Damit behaftet sind die Produktelemente, Eigenschaften und Merkmale sowie Spezifikationen. In Tabelle 7 werden Sekundärinformationen zu diesen Anforderungselementen vorgeschlagen. Sie wird im Laufe der Arbeit noch um einige weitere Attribute ergänzt werden.

<b>PE</b>	<b>P/F</b>	<b>S</b>
Identifikator	Identifikator	Identifikator
Bezeichner	Bezeichner	Bezeichner
Name		Titel
Ansprechpartner	Ansprechpartner	Ansprechpartner
Kommentar	Kommentar	Kommentar
Projektnummer(n)		
Entwicklungszustand	Entwicklungszustand	Freigabestand / Version

*Tabelle 7: Sekundärinformationen (1)*

#### **4.2.2 Aufbereitung von Anforderungen**

Mit der Normalisierung in Kapitel 3.1 wurde der erste Schritt in Richtung informationstechnische Verarbeitung von Produkthanforderungen getan. Das Resultat, eine normalisierte Produkthanforderung, ist die semantische Zerlegung einer beliebigen Produkthanforderung in eine definierte Struktur (gemäß Definition 12, 13, 14 und 22). Die Betonung liegt hierbei auf der „Semantik“ – der Bedeutung. Die semantische Verarbeitung von Texten fällt in den Bereich der Künstlichen Intelligenz und ist bis heute offensichtlich noch nicht hinreichend gelöst. Auch die Idee des Semantic Web (zum Beispiel: [Grue-06]), welche mittels Ontologien semantische Zusammenhänge erfassen kann, steckt noch in den Kinderschuhen. Um

dieses Problem beim Aufbau der Produkt-DNA zu entschärfen, wird im Folgenden eine weitere Vereinfachung der Produkthanforderungen vorgenommen. Hierzu werden normalisierte Anforderungen wie beispielsweise „Die Lenksäule darf im Falle eines Frontalaufpralls bei 48,3 km/h unter einem Winkel von 0 Grad auf eine starre Barriere nicht mehr als 127 mm eindringen“, weiter auf das notwendigste Minimum an Information reduziert.

### Definition 28: Skelettierung

Skelettierung<sup>71</sup> ist die Reduktion der Bestandteile einer normalisierten Produkthanforderung auf Begriffe aus dem domänenspezifischen Begriffssystem.<sup>72</sup>

Die Struktur skelettierter Produkthanforderungen folgt der Struktur normalisierter Produkthanforderungen. Die Anforderungsbestandteile hingegen sind auf Begriffe reduziert. Aus grammatikalischer Sicht werden die Produkthanforderungen meist auf Grundbestandteile der Sprache reduziert, das heißt auf Substantive, Verben und Adjektive. Die Semantik von Produkthanforderungen bleibt hierbei gewahrt, jedoch werden stilistische Merkmale vernachlässigt.

Die skelettierte Produkthanforderung im Beispiel lässt sich formal schreiben als:

$$R_F := PE.Lenksäule \oplus$$

$$I: \text{„muss“} \oplus$$

$$F.Frontalaufprall.Eindringtiefe$$

$$( C(PF.Geschwindigkeit: = 48,3 [km/h]),$$

$$C(F.Aufprallwinkel: = 0 [Grad]),$$

$$C(nPE.Barriere: \text{„starr“}),$$

$$): \leq 127 [mm]$$

An dieser Stelle einige Anmerkung zu skelettierten Produkthanforderungen:

Geht man davon aus, dass in den Begriffssystemen die Anforderungselemente eineindeutig identifizierbar sind und die Begriffe in der Produkt-DNA aus den Begriffssystem stammen, so würde es in diesem Beispiel genügen, den Begriff Eindringtiefe zu verwenden. Der Begriff Eindringtiefe spielt nicht nur bei einem Frontalaufprall sondern auch bei einem Seitenaufprall eine wesentliche sicherheits-

71 JÖRG benutzt den Begriff „vereinzelte Anforderung“. „Vereinzelt bedeutet in diesem Kontext, dass ein grammatikalischer Satz genau eine Anforderung enthält“ [Joer-05, Seite123]. Er unterscheidet jedoch nicht streng zwischen Normalisierung und Skelettierung.

72 „Begriffssystem“ wird im Laufe des Kapitels noch näher erläutert

relevante Rolle. Um beide für den Menschen unterscheidbar zu halten, wird der übergeordnete Begriff aus der Begriffssystem herangezogen und zur besseren Lesbarkeit vorangestellt: Frontalaufprall.Eindringtiefe.

Das bis hierhin beschriebene Modell bezieht sich ausschließlich auf das Produkt. Das Produkt kann jedoch nicht isoliert von seiner Umwelt betrachtet werden. Es tritt mit seiner Umwelt in Interaktion, im Besonderen während der Prüfungen und später im Kundeneinsatz. Beteiligt an der Interaktion sind Gegenstände der Umwelt. Diese Gegenstände müssen auch in Anforderungen berücksichtigt werden. In dem oben angeführten Beispiel ist dies die „Barriere“ gegen die das Fahrzeug bei Crash-Prüfungen gefahren wird. Da es oftmals unumgänglich ist, Teilaspekte der Umwelt mit zu berücksichtigen, wird hierzu das *Nicht-Produktelement* eingeführt.

**Definition 29:** Nicht-Produktelement

Ein Nicht-Produktelement (nPE) ist ein Gegenstand (materiell oder immateriell) aus der Umwelt des Produktes. Nicht-Produktelemente kommen nur in Randbedingungen von Produktanforderungen vor.

Zurück zu den skelettierten Produktanforderungen. Formal ist die Schreibweise an die der normalisierten Produktanforderungen angelehnt.

$$R_X := PE \oplus I \oplus X \quad \text{mit } X \in \{ P, F, pe \} \text{ und } X = f(\Sigma C \vee \Sigma RD \vee \Sigma TP)$$

Da die Informationsgranularität feiner ist als bei den normalisierten Produktanforderungen, sind die Einschränkungen, Prüfvorschriften und Anforderungsdokumente explizit mit aufgeführt. Für das Beispiel ist dies:

$$R_F := PE.Lenksäule \oplus$$

I: "muss"  $\oplus$

F.Frontalaufprall.Eindringtiefe

( C(PF.Geschwindigkeit: = 48,3 [km/h]),

C(F.Aufprallwinkel: = 0 [Grad]),

C(nPE.Barriere: "starr"),

RD: "ECE R-12",

TP: "ECE R-12"

):  $\leq$  127 [mm]

Die letzten beiden Darstellungen folgen einer speziell für das Anforderungsmodell entwickelten Notation. Die allgemeine Form für Produkthanforderungen und Schnittstellenanforderungen sind in den Notationen 1 und 2 aufgeführt.

### Notation 1: Skelettierte Produkthanforderung

$$R_X := PE.<Begriff 1> [ : <Wert> ] \oplus$$

I: <Wert>  $\oplus$

X.<Begriff> [ (  $\Sigma$  [NOT] C([ Y.<Begriff 2> ]

[, Z.<Begriff> [ :<Operator> <Wert> <Einheit> ] ] ),

$\Sigma$  RD: <Wert> ,

$\Sigma$  TP: <Wert>

] [ : <Operator> <Wert> <Einheit> ]

mit  $X \in \{ P, F, pe \}$

$Y \in \{ PE, nPE \}$  ; wenn  $Y = PE$  dann: Begriff 2  $\neq$  Begriff 1

$Z \in \{ P, F \}$

Operator = { <,  $\leq$ , =,  $\geq$ , >,  $\neq$  }

**Notation 2:** Skelettierte Schnittstellenanforderung

$$L_X := PE.<Begriff 1> \oplus$$

$$I:<Wert> \oplus$$

$$X.<Begriff> [ : <Operator> <Wert> <Einheit> ] \oplus$$

$$PE.<Begriff 2>$$

mit  $X \in \{ P, F \}$

Operator  $\epsilon \{ <, <=, =, >=, >, \neq \}$

Begriff 1  $\neq$  Begriff 2

Drei Anmerkungen zu den beiden Notationen:

Die *Begriffe* entstammen dem noch später in diesem Kapitel aufgeführten Begriffssystem.

Die *Werte* sind entweder Zahlen, binär oder Zeichenketten aus vordefinierten Listen (zum Beispiel: „starr“, „beweglich“). Die Einheiten sind entweder von technischer (zum Beispiel: Nm) oder nicht-technischer (zum Beispiel: Euro) Art.

Zu Unterscheidung von normalisierten und skelettierten Produktanforderungen in deren Schreibweise entfällt der Index „n“ bei den skelettierten Produktanforderungen (Beispiel: normalisierte Merkmalsanforderung:  $R_{nF}$  aber skelettierte Merkmalsanforderung:  $R_F$ ).

Die Skelettierung lässt manchmal mehrere Möglichkeiten zu. So kann die normalisierte Produktanforderung „Der Motor darf maximal 7,8 l Super verbrauchen“ auf mehrere Arten skelettiert werden:

- (a)  $R_F := PE.Motor \oplus I:<“soll“> \oplus F.Verbrauch(C(PE.Superbenzin)): <= 7,8 [l/100km]$
- (b)  $R_F := PE.Benzinmotor\_Super \oplus I:<“soll“> \oplus F.Verbrauch: <= 7,8 [l/100km]$
- (c)  $R_F := PE.Motor \oplus I:<“soll“> \oplus F.Superbenzinverbrauch: <= 7,8 [l/100km]$

Aus theoretischer Sicht ist Variante (a) der Vorzug zu geben, da die Begriffe keine Kompositionen aus Wörtern für Produktelemente und Wörtern für Eigenschaften oder Merkmalen sind (Beispiel: Superbenzinverbrauch = Superbenzin und Verbrauch). Wie konsequent diese Trennung umgesetzt werden kann, wird sich erst in der Praxis nach ein bis zwei Fahrzeugprojekten herausstellen.

Die Notation für eine skelettierte Produkthanforderung berücksichtigt auch das Ausschlussprinzip. Beispiel: „Das Fahrzeug muss mit einer Klimaanlage ausgestattet sein, jedoch nicht in Verbindung mit dem A13DTJ“ beziehungsweise

$$R_{pe} := PE.Fahrzeug \oplus I.'muss' \oplus pe.Klimaanlage (NOT C(PE.Motor: "A13DTJ"))$$

Produkthanforderungen unterliegen einer Terminologie, genauer, einem Fachwortschatz mit spezifischen Wörtern einer bestimmten Domäne. Die Terminologie ist spezifisch für die Branche und das Produkt. Die Struktur normalisierter oder skelettierte Produkthanforderungen ist universell, jedoch ist die Terminologie meist branchen- oder produktspezifisch. Die Besetzung der Elemente in und um die Anforderungen muss aus Mengen von definierten *Begriffen*, dem *Begriffssystem*, erfolgen. Hierzu zwei Definitionen aus der DIN 2342 Teil 1:

*„Begriff: Denkeinheit, die aus einer Menge von Gegenständen unter Ermittlung der diesem Gegenständen gemeinsamen Eigenschaften mittels Abstraktion gebildet wird“*

*„Begriffssystem: Entsprechend den Begriffsbeziehungen geordnete Menge von Begriffen eines Begriffsfeldes, wobei jeder einzelne Begriff durch die Position innerhalb des Begriffssystems bestimmt ist“*

Entscheidend hierbei ist, dass die Begriffe im Begriffssystem einer Ordnung unterliegen und darüber hinaus in Beziehung zueinander stehen.

Aus den Definitionen für normalisierte Produkthanforderungen und referenzierende Merkmalsanforderungen (Definitionen 12 und 14) wird ersichtlich, dass die Begriffe mindestens für die Elemente PE, nPE, I, P, F in einem für das Modell notwendige Begriffssystem enthalten sein müssen. Für die weiteren Betrachtungen wird das für Anforderungen benötigte Begriffssystem in mehrere Teilsysteme zerlegt, die nachfolgend Kataloge genannt werden. Aus diesen können die benötigten Begriffe ausgewählt werden.

Die Kataloge zu den einzelnen Anforderungselementen der Produkthanforderungen sind als Mengensymbole (Ellipsen mit durchgezogener Linie) in Abbildung 32 links dargestellt.

Weiterhin zeigt Abbildung 32 aus welchen Katalogen die Begriffe für Randbedingungen und Abhängigkeiten stammen (Ellipsen mit gestrichelter Linie).

Die kleinste Begriffsmenge bilden die Gewichtungen mit den zulässigen Begriffen aus der DIN 820-2, Seite 99. Alle anderen Begriffsmengen sind größer. Der genaue Umfang dieser Mengen hängt sehr stark von der Art des Produktes und dem Grad der Anforderungsdetaillierung ab.

Die vier Mengen PE, nPE, P/F<sup>73</sup> und I sind unabhängig voneinander, das heißt, kein Begriff der einen Menge ist in der anderen Menge enthalten. PE und nPE beinhalten möglichst nur Substantive (zum Beispiel: Kühler oder Asphalt), I nur Verbformen gemäß DIN 820-2 und P/F im Wesentlichen Adjektive oder substantivierte Adjektive (zum Beispiel: korrosionsbeständig, Korrosionsbeständigkeit), aber auch Substantive, die keine Gegenstände verkörpern (zum Beispiel: Drehmoment, Markt).

Bei der Menge C hingegen kommt es zu Überschneidungen mit den Mengen P/F und PE. So können Randbedingungen sowohl Begriffe aus P/F (zum Beispiel: Markt) als auch aus PE (zum Beispiel: Turbolader) besitzen.

Da Nicht-Produktelemente nur in Randbedingungen vorkommen dürfen, liegt die Menge nPE vollständig in der Menge C.

Eine Sonderstellung nehmen die Abhängigkeiten (DP) ein. Da diese nur zwischen P und F auftreten können, sind deren Begriffe eine Teilmenge der Menge P/F.

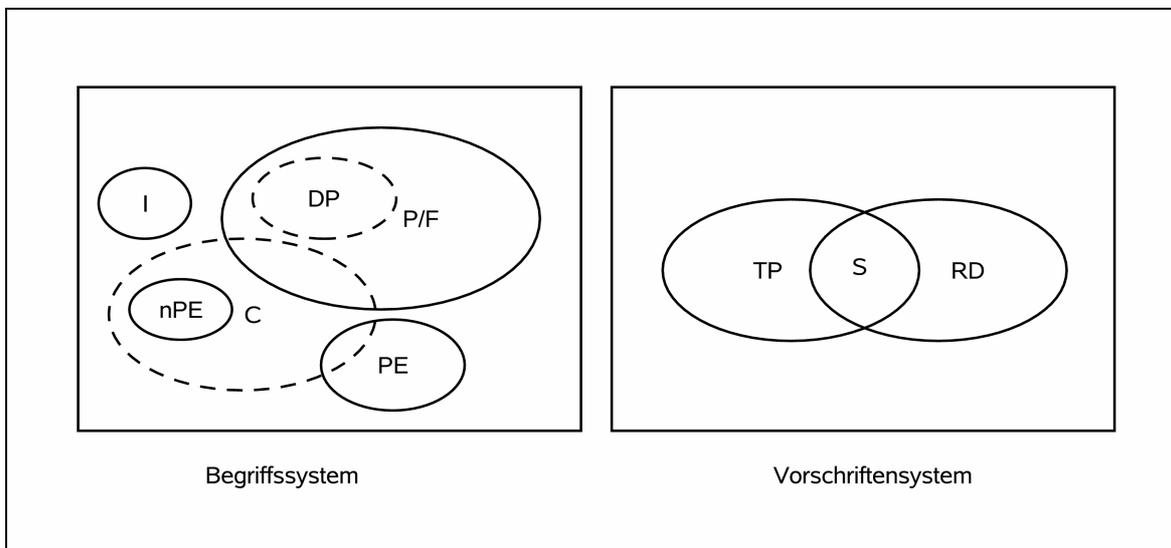


Abbildung 32: Begriffsmengen der Domäne Produktanforderungen

<sup>73</sup> Eigenschaften und Merkmale werden gemeinsam in einem Katalog zusammengefasst, da sie sich nur in der Art der Beurteilung unterscheiden.

Ein Teilsystem des Begriffsystems ist der Produktelementekatalog (kurz: PE-Katalog<sup>74</sup>). Prinzipiell würde hier eine Liste mit den eindeutig identifizierbaren Begriffen genügen. Weil diese auf Grund ihres Umfangs unüberschaubar ist und interdisziplinär anwendbar sein soll, hat sich in der Praxis eine sogenannte *generische Produktstruktur* bewährt. Laut DIN 2331 handelt es sich hierbei um eine hierarchische Struktur, bei der die Elemente durch Bestandsbeziehungen („ist-Teil-von“) miteinander in Beziehung stehen. Die Struktur folgt weiterhin auch funktionalen Aspekten („liefert-Teilfunktion-von“). Es ist zum Beispiel sinnvoll, die Produktelemente „Motor“ und „Getriebe“ unterhalb von „Antrieb“ anzusiedeln, da beide Produktelemente Teilfunktionen des Antriebs verkörpern.

Zwischen einer generischen Produktstruktur, wie es der PE-Katalog ist, und einer Produktstruktur, wie sie zum Teil in der Literatur zu finden ist, besteht ein Unterschied. So wird zum Beispiel im Rahmen des iViP-Projektes der Begriff wie folgt definiert:

*„Die Produktstruktur beschreibt die Bauteile, Baugruppen und Einzelteile eines Produktes und deren Beziehung in einer hierarchischen Ordnung. Gleiche Baugruppen bzw. Teile können dabei mehrmals in der Produktstruktur vorkommen.“ [KTA-02, Seite 172].*

Diese Definition hat für den späteren Aufbau eines „Produktorganismus“ zwei Schwächen: Zum einen die einschränkende Festlegung auf eine Dreiteilung (System, Komponente, (Bau-)Teil) und zum anderen das mehrmalige Vorkommen von Bestandteilen, was starken Stücklistencharakter aufweist.

Erfahrungsgemäß treten bei der Erstellung einer generischen Produktstruktur neben der Begriffsfindung drei Problemkreise auf: Zum Ersten, wie schon angedeutet, das Problem der *Wiederholung*, zum Zweiten das der *Allokation* und zum Dritten das der *Strukturierung*. Dies soll an Beispielen verdeutlicht werden.

Das Produktelement „Sitz“ gehört mit Sicherheit in den PE-Katalog. Ebenso die Unterscheidung nach „Fahrer-“, „Beifahrersitz“ und „Rückbank“. Die Schwierigkeit bezüglich Wiederholungen ergibt sich erst, wenn zwischen dem Rücksitz in der zweiten, dritten usw. Sitzreihe unterschieden wird. Die Bestandsbeziehung „ist-Teil-von“ ist auch hier gegeben, jedoch unterscheiden sich die Rücksitze oftmals nicht im Funktionsumfang. Hier besteht die Gefahr, dass die generische Produktstruktur den Charakter einer Stückliste erhält und gegen ihren Zweck überfrachtet wird.

Die hierarchische Struktur nach dem Prinzip „ist-Teil-von“ einer generischen Produktstruktur hat sich bewährt, macht jedoch manchmal die Zuordnung schwierig. So zum Beispiel bei der Einordnung von Türscharnieren. Es muss bei der Erstellung

---

74 PE-Katalog und generische Produktstruktur werden hier synonym verwendet

einer generischen Produktstruktur entschieden werden, ob die Scharniere zu den Türen oder zur Karosserie gehören. Folglich ist die generische Produktstruktur auch nicht zwingend identisch mit einer Zusammenbaustruktur (zum Beispiel: Prototypenstückliste oder Fertigungsstückliste).

Eine generische Produktstruktur ist ein sehr mächtiges Werkzeug in den Unternehmen – zumindest in der Automobilindustrie (Abbildung 33). Sie entspricht einer Taxonomie<sup>75</sup>, wobei die Klassifikation der Begriffe funktionalen Gesichtspunkten folgt.

In der Praxis kann es allerdings zu interessanten Strukturen kommen. Gerne werden die ersten Elemente unterhalb des Produktelements Fahrzeug nach der klassischen Linienorganisation (Body, Chassis, Elektrik,...) ausgerichtet. Dies hat zwar organisatorische Vorteile, jedoch ist dies nicht im Sinne einer generischen Produktstruktur und folgt auch keiner „ist-Teil-von“ Zerlegung. Ein Produktelement „Elektrik“ hätte gleich zwei Nachteile: Zum einen schränkt es die untergeordneten Produktelemente durch die Vorgabe des Wirkungsprinzips (hier: elektrisch) ein. Als Beispiel kann ein „elektrischer Lenkkraftverstärker“ dienen. Zum anderen werden dadurch auch untergeordnete Produktelemente im Sinne „ist-Teil-von“ falsch positioniert. Ein Lenkkraftverstärker passt besser unterhalb des Produktelements „Lenkung“. Die Empfehlung an dieser Stelle ist, beim Aufbau einer generischen Produktstruktur nur Produktelemente aufzunehmen und diese möglichst nicht mit Eigenschaften oder Merkmalen zu kombinieren<sup>76</sup>.

Die generische Produktstruktur ist weiterhin ein sehr hilfreiches Werkzeug, wenn es um die erstmalige Erzeugung einer Produkt-DNA (Initiale Produkt-DNA) geht. Sie unterstützt hierbei den Top-down-Ansatz auf Grund ihrer funktionalen Struktur.

---

<sup>75</sup> Die Taxonomie ist eine Hierarchie von Begriffen [UMA-03, Seite 3].

<sup>76</sup> Was allerdings in den tieferen Ebenen der hierarchischen Struktur immer schwieriger fällt

0	Fahrzeug
...	
30	Chassis
30.01	Bremsanlage
30.01.01	Bremse
30.01.01.01	Bremssattel
...	Bremsskolben
30.01.01.04	Bremsscheibe
...	Bremssgehäuse
30.01.01.07	Bremstrommel
30.01.03	Feststellbremse
30.01.03.01	Bremskabel
30.01.03.02	Bremshebel
30.01.04	Bremskraftverstärker
30.01.05	Bremsassistent
...	
60	Interieur
60.06	Sicherheitsgurt
60.06.01	Zweipunktgurt
60.06.02	Dreipunktgurt
60.07	Air Bag
60.07.01	Fahrer Air Bag
60.07.02	Beifahrer Airbag
60.07.03	Seiten Air Bag
...	

Abbildung 33: PE-Katalog (schematisch)

Neben den Produktelementen gibt es in Produktanforderungen, genauer in den Randbedingungen, auch Nicht-Produktelemente (siehe Definition 29). Die Struktur für die Nicht-Produktelemente kann eine Mischform aus Hierarchie und Liste sein. Zusätzlich können Attribute zur thematischen Gruppierung mit aufgenommen werden.

Ein weiterer Teil des Begriffssystems umfasst Eigenschaften und Merkmale. Es soll hier in Anlehnung an die generische Produktstruktur als *P/F-Katalog* bezeichnet werden und verkörpert die generische Eigenschafts- und Merkmalsstruktur. Eigenschaften und Merkmale werden an dieser Stelle zusammen betrachtet. Die Unterscheidung der beiden liegt in der subjektiven oder objektiven Beurteilung, was jedoch für das Begriffssystem ohne Bedeutung ist. Von der Art kommt der P/F-

Katalog einem Abstraktionssystem nach DIN 2331 am nächsten. Auch dieses folgt einer hierarchischen Struktur. Ein Begriff wird in mehrere Unterbegriffe unterteilt, die jeweils ein zusätzliches Kriterium besitzen und somit eine Einschränkung oder Spezialisierung des Oberbegriffs darstellen (zum Beispiel: „Insassen Sicht“ differenziert „Sichtfeld vorne“ und „Sichtfeld rückwärtig“; Abbildung 34).



Abbildung 34: P/F - Katalog (Auszug, schematisch)

Die Begriffe des P/F-Katalogs sollten möglichst über Eigenschaften und Merkmale beschrieben werden. Allerdings kann bei der praktischen Erstellung beobachtet werden, dass in tieferen Ebenen des P/F-Katalogs nicht selten die Begriffe eine Kombination aus Produktelement und Eigenschaft oder Merkmal sind. Beispiele: „Tankvolumen“ oder „Türschließgeräusch“. Ähnlich wie beim PE-Katalog gilt auch hier die Empfehlung, soweit wie möglich eine Durchmischung bei der Namensgebung zu vermeiden.

Die Begriffssysteme im Anforderungsmodell sind bis hierhin reine Hierarchien von Begriffen. Um begriffliche Eindeutigkeit zu erreichen, müssen diese Strukturen erweitert werden. Hierzu soll dem Begriffssystem die Funktionalität eines

Thesaurus zugefügt werden, das heißt Synonyme werden mit einbezogen<sup>77</sup>. Bei mehreren Begriffen mit derselben Bedeutung ist einer als *Referenzbegriff* zu definieren. Nur dieser soll in der Produkt-DNA verwendet werden.

Das Teilsystem für die Gewichtung ist eine einfache geordnete Liste. Die Anzahl der in ihr enthaltenen Begriffe ist überschaubar und besteht aus den Begriffen *muss*, *sollte*, *darf* und deren Verneinung gemäß DIN 820-2.

Für die Spezifikationen bzw. Anforderungsspezifikationen und Prüfvorschriften wird ebenfalls eine Systematik benötigt. Es handelt sich hierbei nicht um ein Begriffssystem, da keine Begriffe definiert und/oder hierarchisiert werden, sondern um eine Sammlung von Dokumenten. Die Dokumente sind für gewöhnlich kategorisiert. Drei der wichtigsten Kategorien sind:

- die Herkunft der Vorschriften (unternehmensintern, unternehmensextern),
- die Gesetzesrelevanz (gesetzlich, nicht gesetzlich)
- der Gültigkeitsbereich (Land).

Die Dokumente der Anforderungsspezifikationen und Prüfvorschriften können aus pragmatischen Gesichtspunkten heraus zusammengelegt werden, da diese oft sowohl Produktanforderungen als auch Prüfvorschriften beinhalten.

### 4.2.3 Erstellung der Initialen Produkt-DNA

Zur Erstellung der Initialen Produkt-DNA müssen nachfolgende Voraussetzungen gegeben sein:

Die wohl wichtigste Voraussetzung ist die Erstellung neuer oder die Anpassung und Optimierung schon existierender Begriffsteilsysteme (PE-Katalog und P/F-Katalog). Um die begriffliche Eindeutigkeit innerhalb skelettierter Anforderungen zu gewährleisten, müssen diese Kataloge bei Synonymen Referenzbegriffe liefern.

Zusätzlich müssen Spezifikationen vorgehalten werden – möglichst zentral. Vorgehalten heißt hier, dass sie freigegeben und schnell verfügbar sein müssen. Zu den Spezifikationen zählen sowohl Anforderungsspezifikationen (RD) als auch die

---

<sup>77</sup> Dies ist besonders im englischen Sprachraum wichtig, da es dort besonders viele Synonyme gibt, die bei Nicht-Engländern/Amerikanern nicht selten zu Missverständnissen führen (zum Beispiel: „Hood“ und „Bonnet“ für Motorhaube).

Prüfvorschriften (TP). Beide Arten treten nicht selten vermischt in ein und demselben Dokument auf. Die Vorhaltung gilt sowohl für unternehmensinterne als auch für unternehmensexterne Spezifikationen.

Bei der Erstellung der Initialen Produkt-DNA ist die Existenz eines digitalen Adressbuches von Vorteil. Angedeutet wurde diese Notwendigkeit schon im Zusammenhang mit den Sekundärinformationen (Tabelle 7, Seite 108). Wichtige, prozessbeschleunigende Informationen zu den Ansprechpartner sind unter anderem Name, E-Mail, Rufnummer, Bereichszugehörigkeit. Die Position in der Organisationsstruktur sowie die Rolle sind ebenfalls hilfreich.

Wenn diese Mindestvoraussetzungen gegeben sind, kann mit der Erfassung der Produktanforderungen begonnen werden. Diese durchlaufen hierbei zwei Qualitätsstufen bis sie in einer IT-verarbeitbaren Form vorliegen. Für den Begriff der Qualität gibt es keine allgemein gültige, geschweige denn scharfe Definition. Qualität muss immer im Rahmen des Kontextes, in welchem dieser Begriff verwendet wird, definiert werden. Im vorliegenden Kontext definiert sich die Qualität der Produktanforderungen über deren Struktur und Begriffe. Für das Modell zur Unterstützung einer integrativen Produktentwicklung sollen nachfolgend zwei Qualitätskriterien gestellt werden.

### **Erstes Qualitätskriterium**

Alle Produkt- und Schnittstellenanforderungen müssen in normalisierter Form vorliegen.

Dieses erste Qualitätskriterium stellt sicher, dass gewöhnliche Produktanforderungen mittels Normalisierung in eine semantische, strukturierte Form gebracht werden. Die Qualitätssteigerung wird durch den Vorgang der Normalisierung erreicht.

### **Zweites Qualitätskriterium**

Alle Produkt- und Schnittstellenanforderungen müssen in skelettierter Form vorliegen, wobei die Begriffe der Anforderungselemente {PE, P, F, I} dem Begriffssystem und die Vorschriften {TP, RD} dem Vorschriftensystem entstammen.

Im zweiten Qualitätskriterium liegt eine Qualitätssteigerung darin, dass eindeutige Begriffe für Anforderungselemente verwendet werden.

Neben der Qualität der Produkt- und Schnittstellenanforderungen spielt auch die Vorgehensweise beim Aufbau der Produkt-DNA eine Rolle. Bewährt hat sich in der Vergangenheit die Aufteilung von Gesamtfunktionen in Teilfunktionen. Es ist sinnvoll, mit den Produkthanforderungen an das Gesamtprodukt (hier: Fahrzeug) zu beginnen, und aus diesen dann die Produkthanforderungen an die Systeme, Komponenten und gegebenenfalls Teile herzuleiten.

Des Weiteren spielt die Art der Produkthanforderungen eine wichtige Rolle. So sollen die qualitativen Produkthanforderungen möglichst vor den quantitativen Produkthanforderungen verarbeitet werden.

An Hand eines kleinen Beispiels soll die Methodik zur Erstellung einer Initialen Produkt-DNA aufgezeigt werden.

Eine Produkthanforderung aus dem Bereich Marketing könnte lauten:

„Der neue Van soll sportlich aussehen, ein entsprechendes Fahrverhalten aufweisen und über einen flexiblen Laderaum verfügen“.

Der erste Schritt ist die Normalisierung der ursprünglichen Produkthanforderung. Es entstehen drei normalisierte Produkthanforderungen:

„Der Van soll sportlich aussehen.“

„Der Van soll ein sportliches Fahrverhalten aufweisen.“

„Der Van soll über einen flexiblen Laderaum verfügen.“

Für den Aufbau der Produkt-DNA gilt es, die Produkthanforderung zu skelettieren.

(1)  $R_p := PE.Van \oplus I.„soll“ \oplus PF.Design: „sportlich“$

(2)  $R_p := PE.Van \oplus I.„soll“ \oplus PF.Fahrdynamik: „sportlich“$

(3)  $R_p := PE.Van \oplus I.„soll“ \oplus PF.Ladevolumen: „variabel“$

Die ursprünglich gestellten Produkthanforderungen müssen weiter hinterfragt werden. Was bedeutet sportliches Design, sportliche Fahrdynamik und flexibler Laderaum? Aus den Fragen an die Experten der entsprechenden Fachbereiche<sup>78</sup>

<sup>78</sup> Es ist von Vorteil, wenn erfahrene Experten die Anforderungsdefinition vornehmen. Es sollten möglichst immer Vertreter für die „Stimme des Kunden“ (zum Beispiel: Marketing, Service) sowie die „Stimme der Technik“ (zum Beispiel: Produktentwicklung, Fertigung) bei der Erstellung der Produkthanforderungen zusammenarbeiten. Zu bestimmten Freigabezeitpunkten müssen zu dem noch Vertreter des

leiten sich weitere Anforderungen ab. Zu einem sportlichen Design können viele Meinungen existieren. Während Designexperten solche Fragen in ihrer Formsprache beantworten („Die Kontur der Frontscheibe muss die Fortsetzung der Kontur der Motorhaube sein“), antworten Kunden oftmals in Ausstattungen oder Ausstattungsvarianten. In diesem Beispiel seien folgende zwei Produktanforderungen die Antwort bzw. die Ableitungen: „Der Van muss mit Sportsitzen ausgestattet sein“ und „Die Frontpartie soll keilförmig sein“. In skelettierter Form:

$$(4) R_P := PE.Sitz \oplus I_{„soll“} \oplus PF.Design: „sportlich“^{79}$$

$$(5) R_P := PE.Van \oplus I_{„soll“} \oplus PF.Design.Exterior.Front: „keilförmig“$$

Aus dem sportlichen Fahrverhalten werden beispielsweise nachfolgende Produktanforderungen abgeleitet:

$$(6) R_F := PE.Van \oplus I_{„soll“} \oplus PF.Beschleunigung$$

$$( C(PF.Anfangsgeschwindigkeit: = 0 [km/h]),$$

$$C(PF.Endgeschwindigkeit: 100 [km/h])$$

$$): \leq 8,4 [s]$$

$$(7) R_P := PE.Unterboden \oplus I_{„soll“} \oplus PF.Steifigkeit.Torsion: „hoch“$$

$$(8) R_F := PE.Motor \oplus I_{„soll“} \oplus PF.Leistung: = 100 \dots 110 [kW]$$

Aus der Laderaumanforderung soll die Versenkbarkeit der Rücksitze resultieren:

$$(9) R_P := PE.Rückbank \oplus I_{„soll“} \oplus PF.Flexibilität: „versenkbar“$$

Der Zusammenhang der oben aufgeführten Anforderungen und deren Ableitungen ist in Abbildung 35 dargestellt.

---

Finanzbereichs und des Einkaufs mit eingebunden werden.

<sup>79</sup> Aus Vereinfachungsgründen wird auf die Differenzierung des Sitzes (zum Beispiel „Fahrersitz“) an dieser Stelle verzichtet.

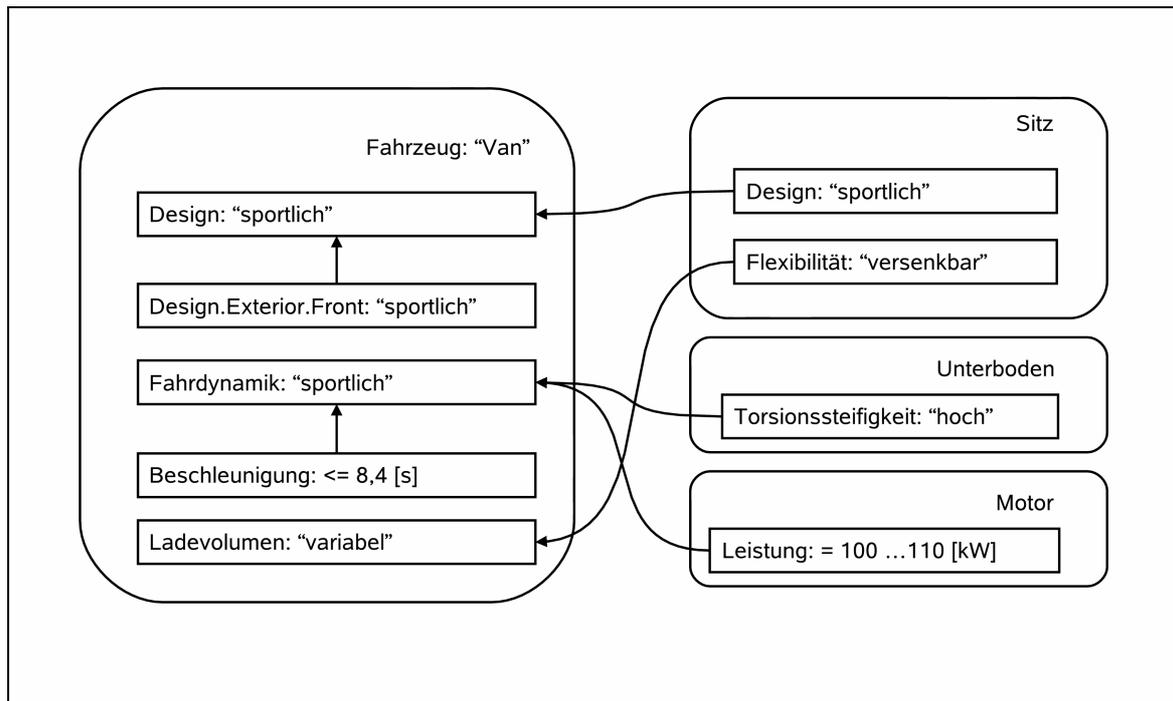


Abbildung 35: Beispiel – „Van“

Ein wichtiger Punkt, der bisher noch nicht angesprochen wurde, ist die Frage, ob in der Produkt-DNA sowohl abstrakte als auch konkrete Anforderungselemente zulässig sind. Zur Erläuterung des Zusammenhangs soll auf das Klassenmodell des objektorientierten Paradigmas zurückgegriffen werden (siehe auch [Oest-04, Seite 246] und [KDDS-96, Seite 182]). In der Objektorientierung wird zwischen abstrakten und konkreten Klassen unterschieden. Der Unterschied liegt darin, dass abstrakte Klassen zwar in einem Modell existieren, jedoch nicht realisiert werden. Auf das oben aufgeführte Beispiel angewandt, kann die Klasse „Sitz“ als abstrakte Klasse betrachtet werden. Diese konkreten Klassen hierzu sind: „Fahrersitz“, „Beifahrersitz“ und „Rückbank“. Letztere werden im Rahmen eines Fahrzeugprojekts realisiert. Für das Anforderungsmodell sollen abstrakte Klassen nur im PE- und dem P/F-Katalog zulässig sein. Für die Produkt-DNA dürfen jedoch nur konkrete Klassen verwendet werden. Zwar würden bei einer IT-Realisierung abstrakte Klassen weniger Speicherplatz in Anspruch nehmen als konkrete Klassen, jedoch würde die Vernetzung der Eigenschaften und Merkmale die Komplexität zusätzlich erhöhen. In den Abbildungen 36 und 37 ist dieser Sachverhalt einmal am Beispiel für „Sitze“ und einmal für „Momente“ bzw. „Leistung“ aufgezeigt.

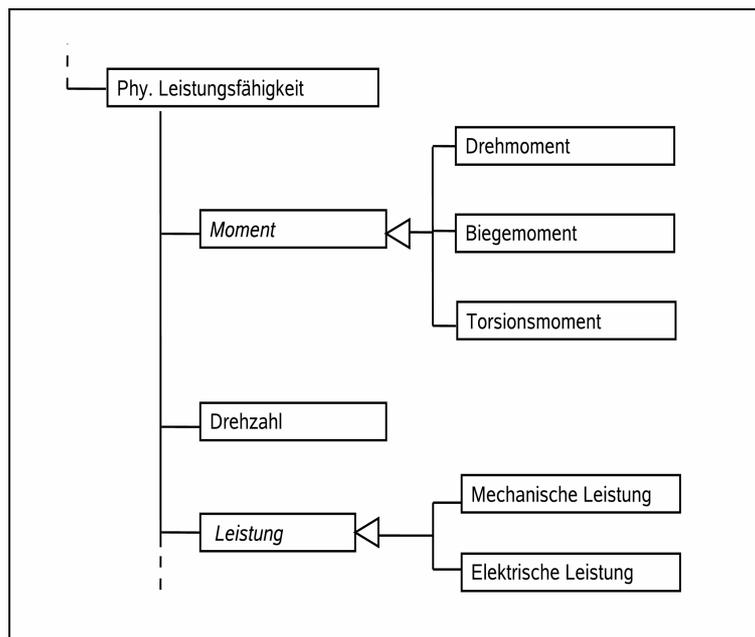


Abbildung 36: P/F-Katalog – Abstrakte und konkrete Eigenschaften sowie Merkmale (Beispiel)

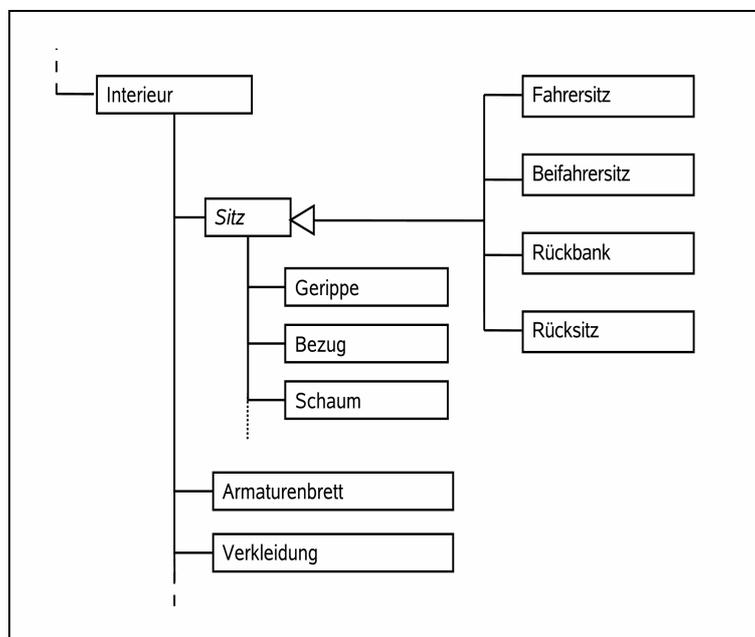


Abbildung 37: PE-Katalog – Abstrakte und konkrete Produktelemente (Beispiel)

Problematisch sind „Pauschalanforderungen“ wie im Beispiel „Der Van muss mit Sportsitzen ausgestattet sein“. Aus dieser Anforderung geht nicht hervor, ob alle Sitze im Fahrzeug Sportsitze sein müssen oder nur die im vorderen Bereich. Charakteristisch für diese Art von Anforderungen ist der PE-Anteil, dessen Substantive im Plural auftreten. Solche Anforderungen lassen sich in einer Produkt-DNA nicht zuordnen und sollten möglichst präzisiert werden bevor sie in die Produkt-DNA eingebaut werden, das heißt, es muss festgelegt werden, welche Sitze die Designeigenschaft „sportlich“ aufweisen sollen.

Man kann sich auch vorstellen, solche Anforderungen bis zu ihrer Präzisierung in einem Produktelement der Produkt-DNA zu „parken“ damit sie nicht vergessen werden. Allerdings kann dies nur als schwache Zwischenlösung betrachtet werden, da auf diese Art von nicht näher spezifizierten Anforderungen nicht aufgebaut werden kann.

Im nächsten Beispiel soll auf eine existierende technische Lösung zu einem Produktelement zurückgegriffen werden. Hierzu wird die oben aufgeführte Leistungsanforderung an den Motor weiter konkretisiert, und es wird angenommen, dass ein Motorenportfolio existiert. Eine abgeleitete Anforderung kann somit lauten: „Der Van soll den 1.9 l CDTI Ecotec-Motor aufnehmen können“.

$$(10) R_{pe} := PE.Van \oplus I: \text{„soll“} \oplus pe.Motor: \text{„1.9 l CDTI Ecotec“}$$

Der Motor wurde auf Grund seiner technischen Daten nach Tabelle 8 ausgewählt und erfüllt die Leistungsanforderung.

	<b>2.2 Direct Ecotec</b>	<b>1.9 CDTI Ecotec</b>
Schadstoffemission	Euro 4	Euro 4
Zylinderzahl	4	4
Zylinderdurchmesser	86 [mm]	82 [mm]
Hub	94,6 [mm]	90,4 [mm]
Hubraum	2198 [cm <sup>3</sup> ]	1910 [cm <sup>3</sup> ]
Maximale Leistung	110 [kW]	74 [kW]
Drehzahl bei maximaler Leistung	5600 [1/min]	3500 [1/min]
Maximales Drehmoment	215 [Nm]	260 [Nm]
Drehzahl bei maximalem Drehmoment	4000 [1/min]	1700-2500 [1/min]
Verdichtungsverhältnisse	12,0 : 1	18,0 : 1

*Tabelle 8: Produktausprägung Motor: „2.2 Direct Ecotec“ und „1.9 CDTI Ecotec“ (Quelle: Werbematerial Opel „Zafira“)*

Eine weitere Anforderung könnte lauten: „Alternativ soll das Fahrzeug mit dem 2.2 l Direct Ecotec-Motor angeboten werden“.

(11)  $R_{pe} := PE.Van \oplus I: \text{„soll“} \oplus pe.Motor: \text{„2.2 l Direct Ecotec“}$

Diese Anforderung ist gleichzeitig eine potentielle Konfiguration des späteren Produktes und beinhaltet eine Variante des Produktelements „Motor“.

Grundsätzlich ist zwischen Varianten von Eigenschaften und Merkmalen sowie Varianten von Produktelementen zu unterscheiden. Die Varianten von Eigenschaften und Merkmalen verkörpern Varianten von normalisierten bzw. skelettierten Anforderungen. Varianten von Produktelementen charakterisieren sich durch:

- dieselben Bezeichner (Beispiel: pe.Motor)
- unterschiedliche Namen (Beispiel: „2.2 l Direct Ecotec“, „1.8 l Ecotec“)
- unterschiedliche Identifikatoren
- mindestens ein Unterschied in der Anzahl der Eigenschaften und Merkmale oder mindestens ein Unterschied in den Soll- oder Ist-Werten der Eigenschaften oder Merkmale

Die Anforderungsbeispiele (10) und (11) stehen für zwei Themenkreise: Zum einen die Einbindung von *Produktausprägungen* und zum anderen *Varianten*.

Produktausprägungen sind schon existierende technische Lösungen, das heißt Systeme oder Komponenten, die fertig entwickelt sind. So zum Beispiel Motoren, Fensterheber oder Achssysteme, die auch schon im Vorgängerprojekt zur Anwendung kamen. Kennzeichnend für Produktausprägungen sind Eigenschaften oder Merkmale, zu denen Ist-Werte existieren. Im Falle von Produktausprägungen besitzen Produktelemente den Status „released“, und ihre Eigenschaften und Merkmale befinden sich im Status „validated“. Dieser Zustand ist für das Anforderungsmodell weniger von Bedeutung, jedoch zeigt er den Entwicklern an, dass sich die Ausprägung des Produktelementes in Serienreife befindet.

Der zweite Themenkreis betrifft die Varianten<sup>80</sup>. Am häufigsten tritt dieser Fall auf, wenn funktional und geometrisch ähnliche Systeme, Komponenten oder Teile während der Entwicklung als Alternativen untersucht oder optional beim Kauf eines Fahrzeugs angeboten werden. Alle Varianten eines Produktelements stehen gleichberechtigt nebeneinander, jedoch nur eine Variante darf zu einem Zeitpunkt in einer Produkt-DNA bzw. einem Produktorganismus aktiv sein (Abbildung 38), da zum Beispiel nicht gleichzeitig der „1.9 l CDTI Ecotec“ und der „2.2 l Direct Ecotec“ in demselben Fahrzeug existieren können.

Wie schon erwähnt, stehen Varianten gleichberechtigt in einer Produkt-DNA nebeneinander. Damit Varianten voneinander „wissen“, müssen diese miteinander verknüpft werden.

### **Definition 30:** Variantenverknüpfung

Eine Variantenverknüpfung (VL) verbindet zwei gleichberechtigte Varianten von Produktelementen miteinander.

---

<sup>80</sup> Wenn nicht explizit ausgewiesen, sind mit Varianten Produktelementvarianten gemeint.

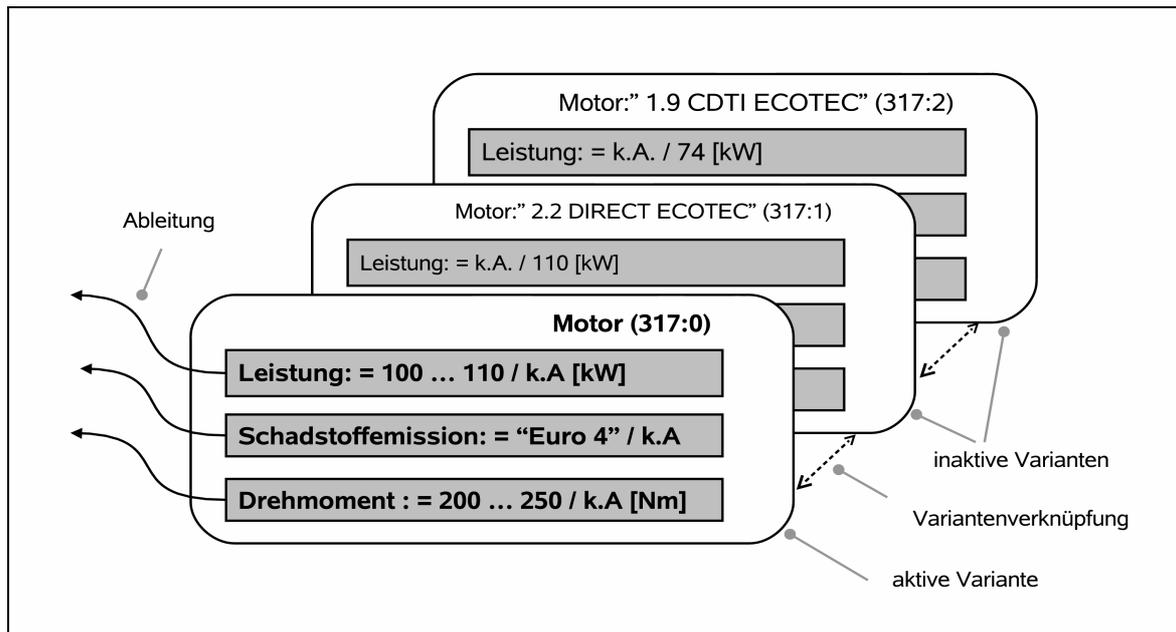


Abbildung 38: Aktive und inaktive Varianten (Beispiel: Motor)

Neben dem Darstellungsproblem ist die Handhabung der Varianten wahrscheinlich die größte Herausforderung bei der Erstellung einer Produkt-DNA. Die Schwierigkeit liegt in den Beziehungen zwischen den Produktelementen. Dazu gehören die Ableitungen und Cross Links und auch die Abhängigkeiten und Randbedingungen. Lässt man die Abhängigkeiten und Randbedingungen vorerst außen vor und beschränkt sich auf Varianten der Produktelemente, so können zwei extreme, konträre Lösungsansätze aufgezeigt werden:

#### Lösungsansatz 1: Neue Produkt-DNA

Zu dem Produktelement  $b$  in Produkt-DNA  $A$  soll eine Variante  $b_1$  mit in die Entwicklung aufgenommen werden. In diesem Fall, wird eine neue Produkt-DNA  $A'$  mit der Variante  $b_1$  erzeugt. Vorteil dieses Vorschlags ist, dass die ohnehin schon komplexe Vernetzung der Produktelemente keine Varianten berücksichtigen muss. Dem gegenüber steht der Nachteil, dass es eine große Anzahl neuer Produkt-DNAs zu beherrschen gilt. Es kommt hinzu, dass alle Produktelemente aus  $A$  ungleich  $b$  als Kopien in  $A'$  angelegt werden müssen. Bei Änderungen der Originale müssen die Kopien den Änderungen nachgeführt werden. Neben der vertikalen und horizontalen Vernetzung innerhalb einer Produkt-DNA entsteht eine Vernetzung zwischen den Produktelementen der DNAs, das bedeutet, die Kopien der PEs in  $A'$  zeigen auf die Originale der PEs in  $A$  (Abbildung 39, Beispiel:  $f'$  zeigt auf  $f$ ).

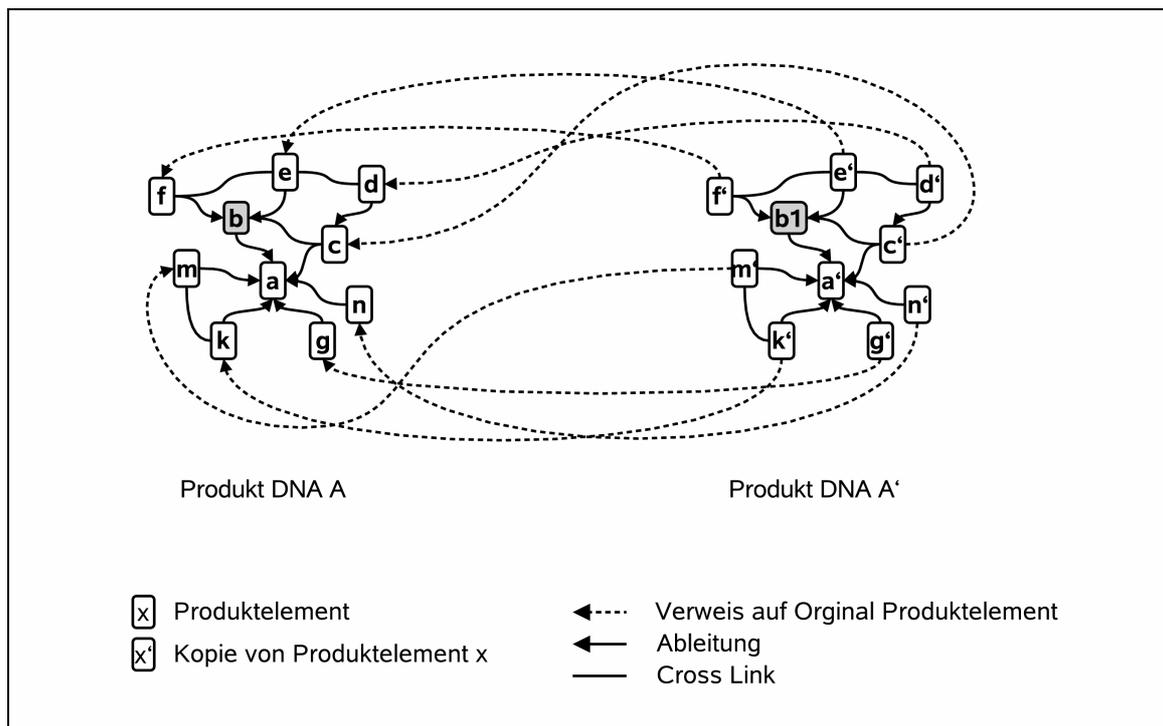


Abbildung 39: PE-Variante erzeugt neue Produkt-DNA

### Lösungsansatz 2: Varianten innerhalb der Produkt-DNA

In diesem Fall befindet sich an der Position von Produktelement  $b$  weitere Produktelemente  $b_1, \dots, b_n$  im Sinne der Variantenverknüpfungen. Zu einem Zeitpunkt darf dort jedoch nur eine und genau eine Variante aktiv sein (Abbildung 38, Seite 128). Beim Austausch von Produktelement  $b$  durch eine Variante  $b_1, \dots, b_n$  kann die P-DNA in einen instabilen Zustand geraten.

So können hinsichtlich der Ableitungen sowohl unter- als auch übergeordnete Produktelemente, Eigenschaften oder Merkmale ihre Existenzberechtigung verlieren.

Das gleiche gilt auch für Cross Links. Wenn zum Beispiel zwei Produktelemente horizontal miteinander verknüpft sind, so entstehen nach dem Austausch von Produktelement  $b$  durch  $b'$  offene Schnittstellen.

Im Gegensatz zu den Ableitungen und Cross Links stehen Abhängigkeiten nicht zwangsläufig mit unmittelbar benachbarten Produktelementen in Beziehung. Das Auffinden der betroffenen Produktelemente, Eigenschaften und Merkmale in der Produkt-DNA gestaltet sich deshalb als schwierig. Geeignete Elementfunktionen erleichtern es dann, die Konsistenz zu prüfen. Die Re-Stabilisierung selbst kann jedoch nur über Entscheidungen durch den Menschen erfolgen.

Der Vorteil von Lösungsansatz 2 liegt darin, dass innerhalb einer Produkt-DNA Varianten vorgehalten werden und, im Gegensatz zu Ansatz 1, keine Kopie der Produkt-DNA erzeugt werden muss. Von Nachteil ist, dass die „gewachsene“ Struktur der Produkt-DNA temporär destabilisiert wird.

Beide Ansätze sind konträr zueinander und Extremfälle hinsichtlich der Lösung des Variantenproblems. Für die praktische Anwendung ist eine Kombination aus beiden Ansätzen denkbar. Welchem von beiden Lösungsansätzen der Vorzug zu geben ist, hängt vom Grad der Vernetzung (noch „kaum“ oder schon „hochgradig“ vernetzt), der Integrationsebene (Produkt-, System- oder Komponentenebene) sowie der Art der Beziehungen (nur Ableitungen und Cross Links oder auch Abhängigkeiten) des betreffenden Produktelements ab.

### 4.3 Elementfunktionen

Das Anforderungsmodell geht über die klassische Handhabung von Anforderungen und deren Beziehungen hinaus, da darin bestimmte Anforderungselemente „aktiv“ am Entwicklungsprozess teilnehmen und hierdurch dem Mitarbeiter einen Teil der administrativen Tätigkeit abnehmen. Wie in Abbildung 31, Seite 105 schon erläutert, wird hierzu die Produkt-DNA um sogenannte Elementfunktionen erweitert. Elementfunktionen sind nach Definition 26, Seite 99 Funktionen zur Verarbeitung von internen oder externen Reizen auf Anforderungselemente aus der Menge {PE, P, F}.

In Hinblick auf eine spätere Implementierung und möglichst hohe IT-Plattformunabhängigkeit soll ein Produktorganismus möglichst „schlank“ gehalten werden, das heißt, der Produktorganismus soll nur mit den notwendigen Elementfunktionen ausgestattet sein. So sollen zum Beispiel Funktionen zur Visualisierung des Produktorganismus oder dessen Bestandteile außerhalb des Organismus liegen. Betrachtet werden an dieser Stelle nur immanente Elementfunktionen, welche die „Lebensfähigkeit“ des Produktorganismus sicherstellen.

Grob aufgeteilt fallen hierunter folgende drei Funktionsgruppen:

- Konsistenz
- Kommunikation
- Verwaltung

Elementfunktionen der ersten Gruppe nehmen Aufgaben zur Sicherung der Konsistenz der Beziehungen wahr. Im Falle, dass Produktelemente ausgetauscht oder Eigenschaften und Merkmale aktiviert oder deaktiviert werden, entstehen oftmals

Inkonsistenzen. Diese gilt es aufzuspüren und nach vorgegeben Regeln zu beheben oder sie als solche zu kennzeichnen und den Anwender darüber zu informieren. Geprüft werden muss hierbei neben der Anzahl der Beziehungen auch die Kompatibilität der Eigenschaften und Merkmale an den Enden der Ableitungen und Cross Links. Da die Begriffskataloge von den Produktorganismen entkoppelt sind, sollten Elementfunktionen aus dieser Gruppe auch die Begriffskonsistenz zwischen beiden sicherstellen. Die Konsistenzprüfung der Begriffe kann entfallen, wenn gewährleistet ist, dass einmal definierte Begriffe nicht mehr geändert werden. Die Konsistenzprüfung betrifft die Anforderungselemente PE, I, P, F, RD, TP, D, CL, DP.

Änderungen an Anforderungselementen können auf andere Anforderungselemente wirken. Damit eventuell betroffene Anforderungselemente reagieren können, müssen diese benachrichtigt werden. Nachrichten über Manipulationsinformationen spielen eine wichtige Rolle in der Kommunikation zwischen Anforderungselementen. Nachrichten können sowohl zwischen dem selben Typ von Anforderungselement aber auch zwischen verschiedenen Typen von Anforderungselementen ausgetauscht werden.

Die zweite Gruppe betrifft die Kommunikation zwischen Anforderungselementen. Die Kommunikation geschieht über Nachrichten. Inhalte der Nachrichten sind zum Beispiel Informationen über die Änderungen von Merkmalswerten. Ein wichtiger Spezialfall im Nachrichtenaustausch zwischen Anforderungselementen ist der, über die Grenzen eines Produktorganismus hinaus. Der Hintergrund in diesem Zusammenhang ist die Wiederverwendung von Produkthanforderungen bzw. Produktelementen in anderen Produktorganismen im selben oder anderen Fahrzeugprogrammen. Dies sind hauptsächlich strategische Produkthanforderungen (zum Beispiel: „Alle Fahrzeuge mit Projektbeginn ab 1.8.2006 sollen ein 5 Sterne NCAP Rating erreichen“ oder „In möglichst vielen Fahrzeugen soll der Türgriff TG0815 eingesetzt werden“) oder auch gesetzliche Produkthanforderungen.

Eine weitere wichtige Anwendung ist die Benachrichtigung des Menschen über Ereignisse im Produktorganismus. Wichtige Ereignisse sind z.B. Zustandsänderungen untergeordneter Produktelemente oder Inkonsistenzen bei der Analyse von Abhängigkeiten.

Die dritte wichtige Gruppe an Elementfunktionen behandelt administrative Aufgaben. Die Wahrung der Datenpersistenz ist mit Sicherheit eine der Kernaufgaben. Des Weiteren die Aufzeichnung der Historie, das heißt die Änderungen an Anforderungselementen und zwar mit der Information der ursprünglichen Werte, wann und durch wen die Änderungen vorgenommen wurden. Die letzte Funktion in dieser Gruppe ist die Verwaltung der Zugriffsrechte.

Die drei Gruppen an Elementfunktionen sind zur Übersicht noch einmal in Abbildung 40 dargestellt.

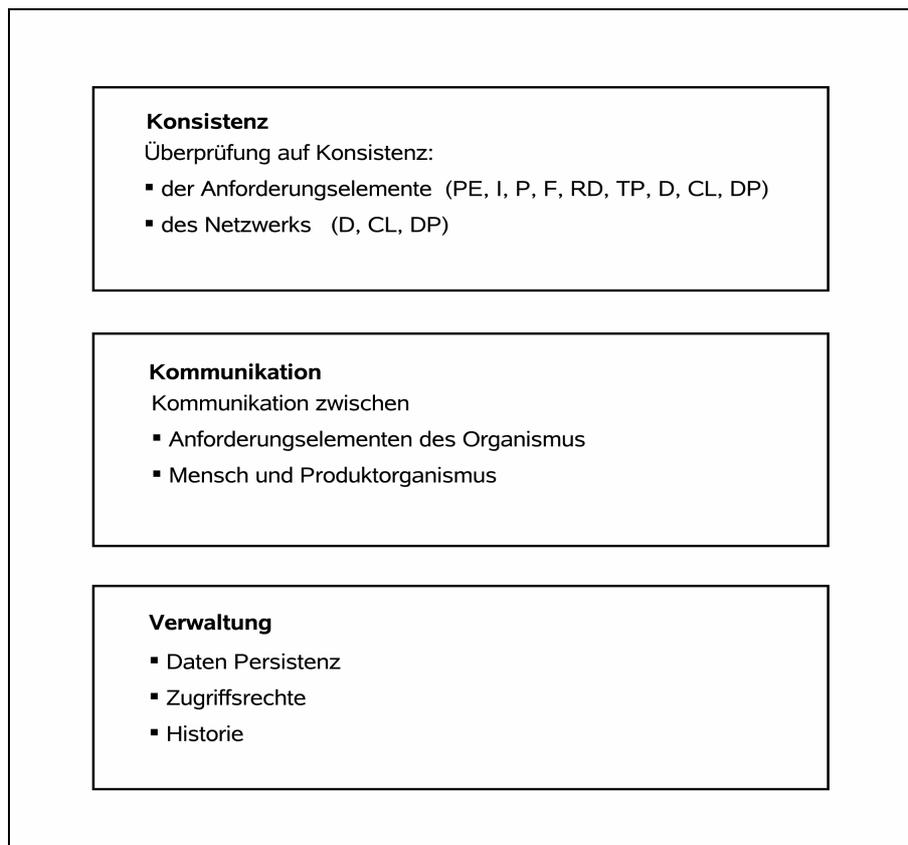


Abbildung 40: Kategorien der Elementfunktionen

## 4.4 Realisierung (theoretisch)

Im Nachfolgenden werden einige Überlegungen darüber angestellt, wie das Anforderungsmodell in der Praxis zu realisieren ist. Hierzu sollen die Themen Implementierung des Modells, die Schnittstelle zum Menschen und die Anbindung an eine bestehende IT-Landschaft betrachtet werden.

### 4.4.1 Implementierung

Wie in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich beschrieben, sind die Bestandteile eines Produktorganismus die sogenannten Anforderungselemente. Der folgende Vorschlag zielt darauf ab, wie diese Anforderungselemente zu realisieren sind, damit letztendlich die Produkt-DNA beziehungsweise ein Produktorganismus

entsteht. Zur Beschreibung werden teilweise UML-Diagramme<sup>81</sup> herangezogen werden, jedoch wird auch hier der Verständlichkeit Vorrang vor der stringenten Anwendung dieser Beschreibungssprache eingeräumt.

Das IT-Modell soll mit zwei aktiven Bestandteilen auskommen: Den Produktelementen sowie den Eigenschaften und Merkmalen (letztere auch hier wieder als PF zusammengefasst). Aktiv bedeutet, dass die PEs und die PFs über Operationen und Attribute verfügen, die im Sinne der Elementfunktionen die Konsistenz, Kommunikation und Verwaltung innerhalb des Produktorganismus ermöglichen. Zur Modellierung wird eine abstrakte Klasse mit Namen Informationselement (IE) eingeführt (Abbildung 41). Diese Klasse wird differenziert in die abstrakten Unterklassen PE-Bezeichnung und PF-Bezeichnung. Erst die nächst tiefere Ebene besteht aus konkreten Klassen, von denen aus Instanzen gebildet werden können. Die Klassen mit den Namen PE-Bezeichner sowie die Klassen mit den Namen PF-Bezeichner verkörpern die beiden Kataloge für die Produktelemente sowie den Katalog der Eigenschaften und Merkmale. Zur Anwendung beim Aufbau der P-DNA kommen nur die Instanzen der Klassen PE-Bezeichner und PF-Bezeichner. Der Grund für das Anlegen der abstrakten Klasse IE liegt darin, dass diese Klasse Operationen und Attribute beinhaltet, die letztlich allen PEs und PFs gemeinsam sind. So zum Beispiel eine eindeutige für den Anwender handhabbare ID oder auch Operationen zum versenden von Nachrichten. Die abstrakten Klassen PE-Bezeichnung und PF-Bezeichnung unterscheiden sich im Operationsumfang. So wird beispielsweise in der Klasse PE-Bezeichnung die Fähigkeit zur Ausbildung von Variantenverknüpfungen verankert, was für die Eigenschaften und Merkmale im Modell nicht vorgesehen ist.

Ein weiteres Anforderungselement ist die Gewichtung. Diese wird, je nach Anforderungsart, entweder der Eigenschaft, dem Merkmal oder dem untergeordneten Produktelement zugeschlagen. Dies bedeutet, dass die Objekte der PE und PF Bezeichner mit dem Attribut Gewichtung versehen sein müssen.

Die Eigenschaften, Merkmale und Produktelemente stehen in Beziehung zueinander. Eine Art von Beziehungen sind die Ableitungen. Diese sollen im IT-Modell den Anforderungselementen PE und PF zugeschlagen werden.

Ableitungen sind gerichtete Kanten, das heißt auch die Richtungsinformation muss mitgeführt werden. Zur besseren Navigation in der Produkt-DNA ist es von Vorteil, die Information zu einer Ableitung jeweils beiden beteiligten Anforderungselementen zur Verfügung zu stellen. Das Gleiche gilt auch für Cross Links und Variantenverknüpfungen, wobei diese ungerichtete Kanten sind.

---

81 Siehe auch „Unified Modelling Language“, BRJ-99

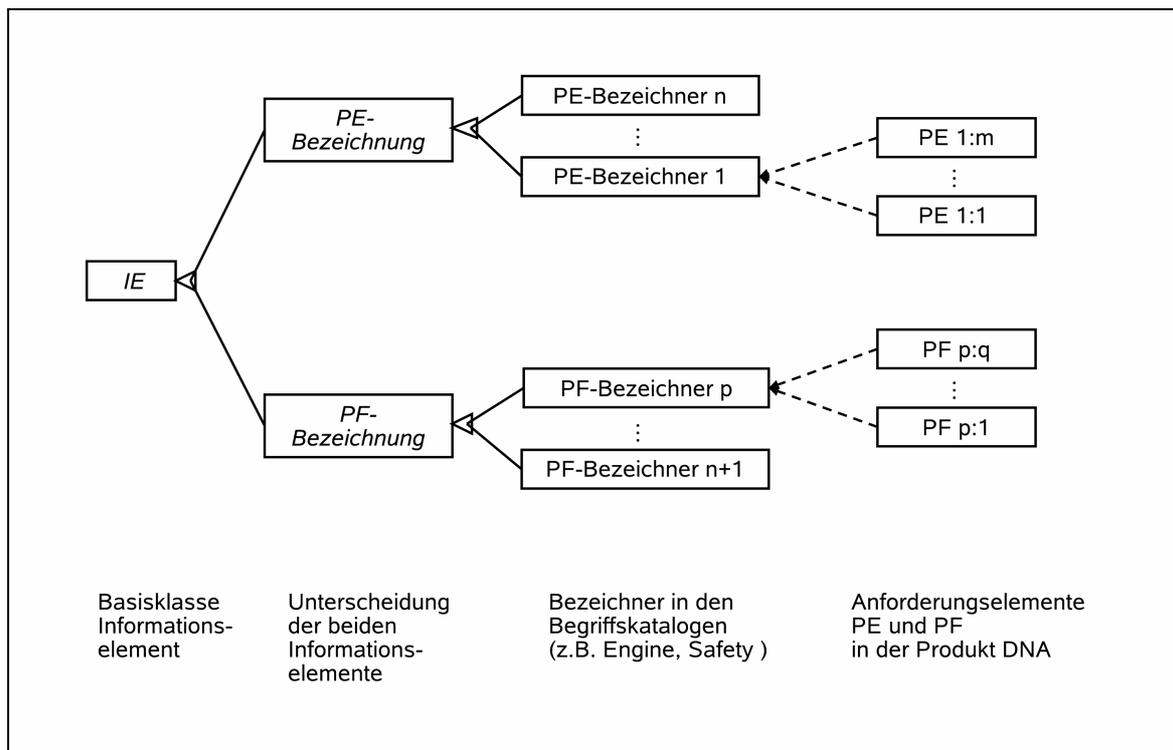


Abbildung 41: Klassenstruktur zu den Anforderungselementen PE und P/F

Für die Spezifikationen wird vorgeschlagen, eine Klasse S anzulegen. Die Objekte der Klasse sind die Spezifikationen. Zur Unterscheidung, ob es sich um eine Prüfvorschrift oder um eine Anforderungsspezifikation handelt, kann ein Attribut eingeführt werden.

Die Nicht-Produktelemente leiten sich aus der Klasse nPE-Bezeichner ab (Abbildung 42).

Um die Handhabung der großen Zahl von Anforderungselementen PE, nPE und PF zu erleichtern, müssen diese strukturiert werden. Zu diesem Zweck sollen alle drei Kataloge eine hierarchische Struktur aufweisen. Diese bietet, sofern sie nicht verändert wird, eine einheitliche, unternehmensweite Sicht auf die oben aufgeführten Anforderungselemente (generische Sicht).

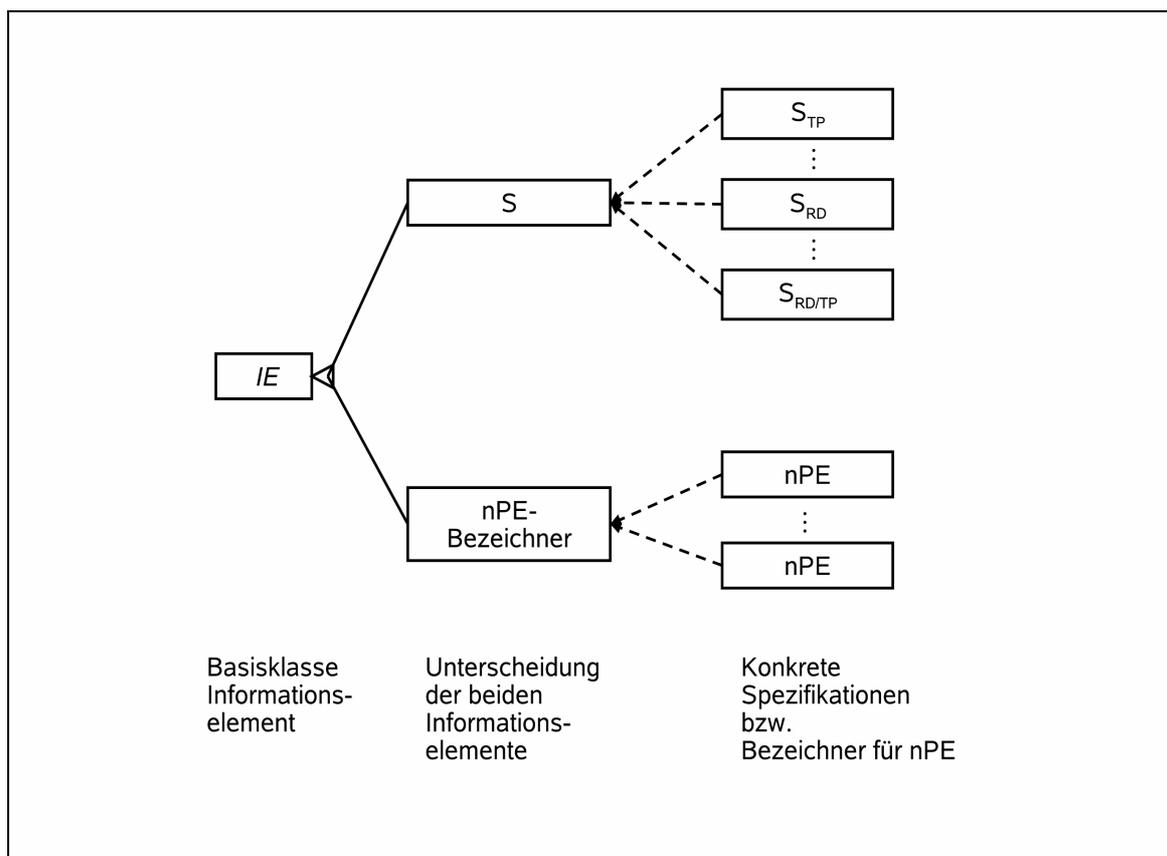


Abbildung 42: Klassenstruktur zu den Anforderungselementen  $S$  (=RD und TP), nPE

Die Produkt-DNAs verlangen neben den drei generischen weitere, zweckspezifische Sichten. Der Zweck wird durch die Organisationseinheiten des Unternehmens sowie durch die Entwicklungsphase, in der sich das Produkt befindet, bestimmt. So zum Beispiel die Einkaufsorganisation, die Produktelemente für Ausschreibungszwecke bündelt, um attraktive Angebote zu erhalten. Zur Verdeutlichung seien exemplarisch in Abbildung 43 die drei Kataloge und in Abbildung 44 eine zweckspezifische Schicht dargestellt.

<b>PE Katalog</b>	
<b>Position</b>	<b>Bezeichner</b>
...	...
30	Chassis (137)
30.01	Bremsanlage (138)
30.01.01	Bremse (139)
30.01.01.01	Bremssattel (140)
30.01.01.02	Bremsscheibe (141)
...	...

<b>P/F Katalog</b>	
<b>Position</b>	<b>Bezeichner</b>
...	...
4	Sicherheit (1231)
4.1	Aufprallsicherheit (1232)
4.1.1	Insassensicherheit (1233)
4.1.2	Frontalaufprall (1234)
...	...

<b>nPE Katalog</b>	
<b>Position</b>	<b>Bezeichner</b>
10	Umgebung (3076)
10.01	Markt (3077)
10.02	Produktionslinie (3078)
20	Kunde (3102)
...	...

Abbildung 43: Begriffskataloge zu PE, PF und nPE (exemplarisch)

<b>Zweckspezifische Sichten</b>			
<b>Zweck</b>	<b>Gruppe</b>	<b>Position</b>	<b>Anforderungselement</b>
Einkauf	5500 Kühlsystem	1	Kühler (901:0)
Einkauf	5500 Kühlsystem	2	Kühlerabdeckung (901:14)
Einkauf	5500 Kühlsystem	3	Schlauch (750:324)
Einkauf	5500 Kühlsystem	4	Schlauch (750:598)
Einkauf	5500 Bremssystem	5	Bremse (139:23)
Einkauf	5500 Bremssystem	6	Bremsscheibe (141:5)
...	...	...	...

Abbildung 44: Zweckspezifische Sicht des Einkaufs (exemplarisch)

Die Realisierung der verbleibenden zwei Anforderungselemente – Randbedingungen und Abhängigkeiten – geschieht über Elementfunktionen.

Neben den Klassen sind für die praktische Anwendung zusätzliche Informationen notwendig. Hierfür soll die bereits eingeführte Menge der Sekundärinformationen erweitert werden (siehe Tabelle 9, Seite 138).

Einige der Attribute werden im Folgenden erklärt:

Wissen über Ansprechpartner zu den Objekten und Klassen in den Katalogen wirkt sich prozessbeschleunigend aus, deshalb beinhalten die Objekte die wichtigsten Information (zum Beispiel: Telefonnummer und E-Mail-Adresse) zu Ansprechpartnern.

Die Kommentarfelder können für verschiedene Zwecke genutzt werden. Zum einen, um zusätzliche Informationen, insbesondere zu den Produktelementen sowie den Eigenschaften und Merkmalen zu beherbergen, die über die eigentliche Produktanforderung hinausgehen, zum anderen, um gegebenenfalls die Originalanforderung zu hinterlegen.

An dieser Stelle folgende Anmerkung: Aus den Anforderungen wird nach der Normalisierung und Skelettierung die Produkt-DNA aufgebaut. Es ist damit zu rechnen, dass anschließend Änderungen an der P-DNA direkt und nicht über neue, textuell erfasste Anforderungen durchgeführt werden. Aus der P-DNA lassen sich folglich weder die ursprünglichen Texte der Anforderungen noch die zeitliche Abarbeitung der Anforderungen rekonstruieren. Der Prozess der Erstellung ist in diesem Fall irreversibel. Dies ist unkritisch, sofern Auftraggeber und Auftragnehmer die P-DNA als gemeinsames Werkzeug anerkennen. Sollte eine Partei auf die Original-Anforderungsspezifikation bestehen, so lassen sich die Originalsätze oder Dokumente auch in den entsprechenden Anforderungselementen referenzieren (jedoch kaum nachführen).

Im Gegensatz zu den Bezeichnern, die durch die Kataloge festgeschrieben sind und möglichst nicht geändert werden sollen, wird der Name eines Produktelements erst in der Produkt-DNA angelegt (Beispiel zu einem Motor: „2.2 l Direct Ecotec“). Die Identifikation garantiert die Eineindeutigkeit des Objektes während der Name die Wiedererkennung durch den Menschen ermöglicht.

Die Basiszustände richten sich nach den Werten aus Tabelle 4, Seite 93. Für weitere individuelle Zustände muss gegebenenfalls ein weiteres Attribut angelegt werden.

<b>PE</b>	<b>nPE</b>	<b>P/F</b>	<b>S</b>
Identifikator	Identifikator	Identifikator	Identifikator
Bezeichner	Bezeichner	Bezeichner	Bezeichner
Name			Name
Ansprechpartner	Ansprechpartner	Ansprechpartner	Ansprechpartner
Kommentar	Kommentar	Kommentar	Kommentar
Projekt- nummer(n)			
Basiszustand		Basiszustand	
		Randbe- dingung(en)	
		Anforderungs- spezifikation(e)	
		Prüf- vorschrift(en)	
Gewichtung		Gewichtung	
Aktiv-Indikator		Aktiv-Indikator	
Version (inkl. Zeitstempel)		Version (inkl. Zeitstempel)	Version (inkl. Freigabedatum)
Änderungs- historie		Änderungs- historie	
Original Produktelement Referenz			
CAD-Daten Referenz(en)			

*Tabelle 9: Sekundärinformationen (2)*

Der Aktiv-Indikator steuert sowohl bei den Produktelementen als auch bei den Eigenschaften und Merkmalen, ob ein Anforderungselement in der Produkt-DNA aktiviert wurde. Wie schon im Kapitel 4.2.3 im Rahmen von Varianten angesprochen, kann ein deaktiviertes Produktelement oder eine deaktivierte Eigenschaft oder ein deaktiviertes Merkmal die Existenz untergeordneter Produktelemente und Schnittstellen in Frage stellen.

Die Änderungshistorie ist wichtig, um nachvollziehen zu können, von wem, wann und möglichst auch warum das dazugehörige Anforderungselement geändert wurde.

Falls eine Kopie eines Produktelements benötigt wird, zeigt dieses Attribut auf das originale Produktelement. Nur dieses soll entwickelt werden.

Produktelemente haben im Anforderungsmodell auch eine geometrische Ausprägung. Das Attribut CAD-Daten soll den Verweis auf die Geometriedaten aufnehmen.

Neben den Referenzen, die sich auf Geometriedaten beziehen, sind noch weitere möglich, die bei Bedarf zugefügt werden müssen (Beispiel: Referenzbezüge auf Testberichte).

#### **4.4.2 Anwenderschnittstelle**

Die große Zahl der Produktelemente, Eigenschaften und Merkmale sowie deren Beziehungen untereinander macht das Anforderungsmanagement schwierig. Allein auf Fahrzeugebene (PKW) sind 1500 normalisierte Anforderungen als realistisch zu erachten. Geeignete Visualisierungsformen können dieses Problem entschärfen.

##### **Tabellen**

Die heute und auch wohl weiterhin wichtigste Visualisierungsform ist die tabellarische Darstellung. In Verbindung mit den Strukturen der Kataloge sowie den zweckgebundenen Sichten kann die Anzahl der darzustellenden Anforderungselemente im überschaubaren Rahmen gehalten werden. Vorteil dieser Visualisierungsform ist die einfache Bedienbarkeit und der gewohnte Umgang mit Tabellen mit Hilfe von Office-Software. Von Nachteil kann sein, dass die Tabellen trotz der Einschränkung der darzustellenden Daten immer noch zu groß und unhandlich sind.

## CAD

Die zweite denkbare Möglichkeit ist die räumliche Visualisierung unter Verwendung von CAD- und VR-Techniken. Für Produktelemente, zu denen noch keine Geometriedaten existieren, wären geometrische Primitive (zum Beispiel Rechtecke oder Kuben) als Platzhalter bis zur Ausarbeitung der Geometrie denkbar. An Stelle der Primitive könnten auch die Geometriedaten schon existierende ähnliche Produktelemente herangezogen und schemenhaft dargestellt werden. Der erhoffte Vorteil ist die bessere Wahrnehmung auf Grund der Ähnlichkeit mit dem späteren Produkt. Allerdings könnte dies auch die kreative Arbeit der Stylisten und Konstrukteure negativ beeinflussen.

Die Repräsentation der Eigenschaften und Merkmale sowie weiterer Attribute der Produktelemente als Erweiterung zu den heute schon vorhandenen beschreibenden Attributen zu den Geometriedaten erfolgt als Text.

## Tree Maps und Hyperbolic Trees

Eine weitere mögliche Darstellungsform und die zugehörigen Navigationsmethoden wurde in der Diplomarbeit von MÜLLER untersucht [Muel-06]. MÜLLER schlägt in seiner Arbeit die Verwendung von zwei Darstellungsformen zur Visualisierung von Produktanforderungen vor: Tree Maps<sup>82</sup> und *Hyperbolic Trees*.

Tree Maps wurden zu Beginn der neunziger Jahre von Ben Shneiderman am College Park, Maryland [JoSh-91], [Shne-92] vorgestellt. Tree Maps eignen sich zur Darstellung von breiten hierarchischen Strukturen, weshalb sie auch zur Darstellung der Anforderungen unter Zuhilfenahme des P/F-Katalogs herangezogen werden (Abbildung 45).

---

82 siehe auch [Zieg-07, Seite 120 ff.]

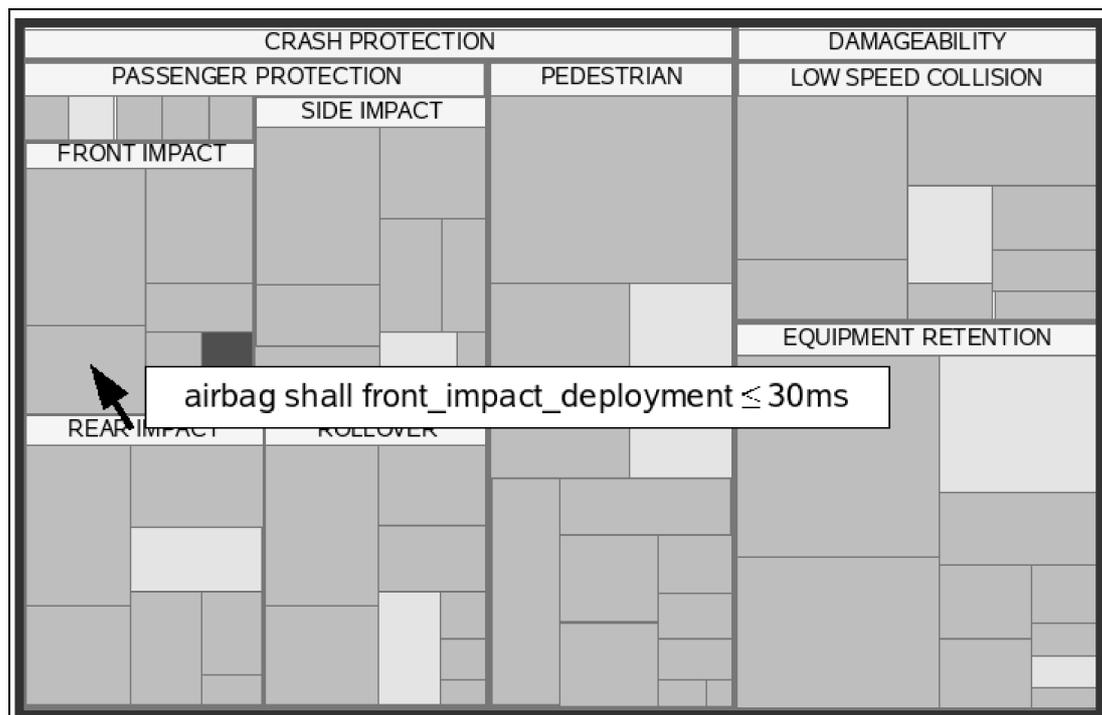


Abbildung 45: Tree Map aus der Sicht des P/F-Katalogs (Beispiel, Quelle [Muel-06])

Hyperbolic Trees wurden Mitte der neunziger Jahre von Xerox PARC [LRP-95] entwickelt. Sie eignen sich gut zur Darstellung von tiefen hierarchischen Strukturen. Aus diesem Grund wurden Hyperbolic Trees zur Darstellung von Anforderungen über den PE-Katalog vorgeschlagen (Abbildung 46).

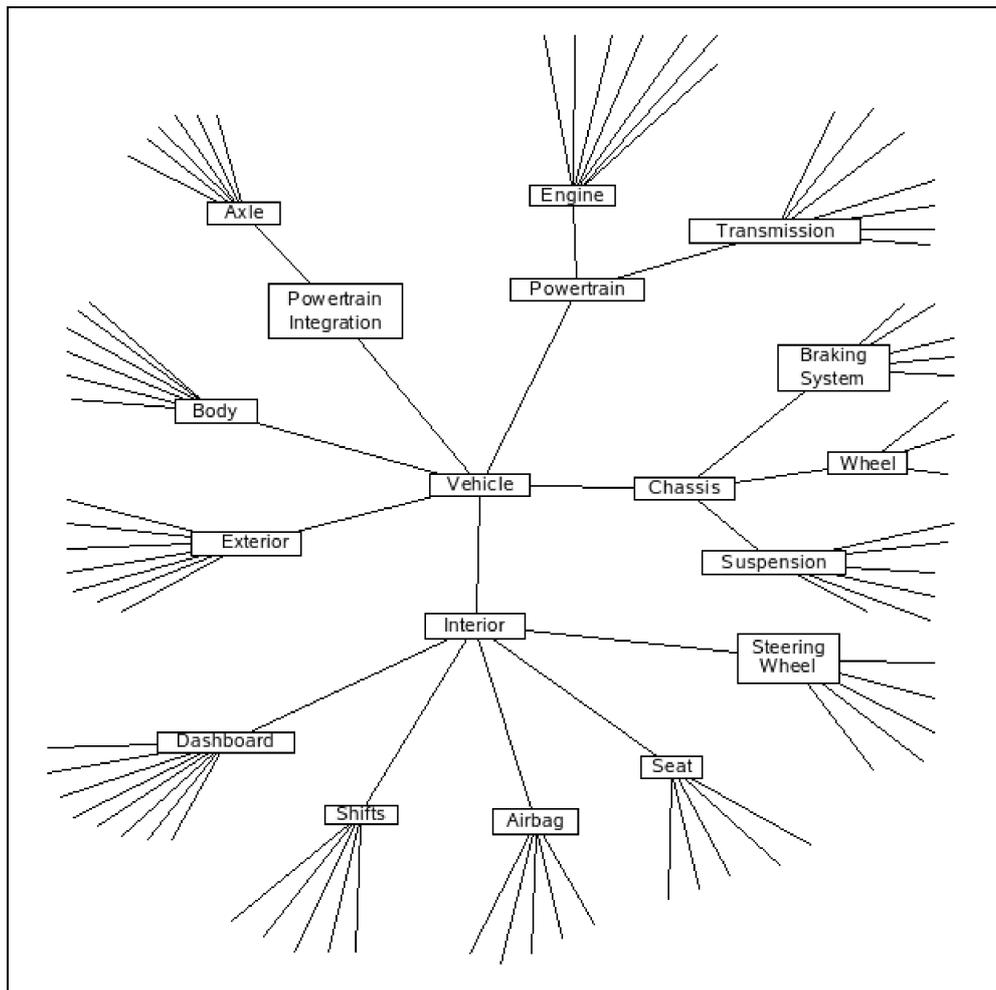


Abbildung 46: Hyperbolic Tree mit Sicht gemäß PE-Katalog (Beispiel, Quelle [Muel-06])

Beide Darstellungsformen miteinander verknüpft erlauben die Navigation durch die Produkt-DNA. Um ein einheitliches Erscheinungsbild zu gewährleisten, werden Sichten herangezogen – vorzugsweise die Sichten definiert über den PE- und den P/F-Katalog (Abbildung 47). Der erhoffte Vorteil dieses Vorschlags ist die Wahrung des Gesamtüberblicks über die Produkt-DNA. Nachteilig ist, dass sich Anwender erst an die Art und Weise dieser Darstellungsform gewöhnen müssen.

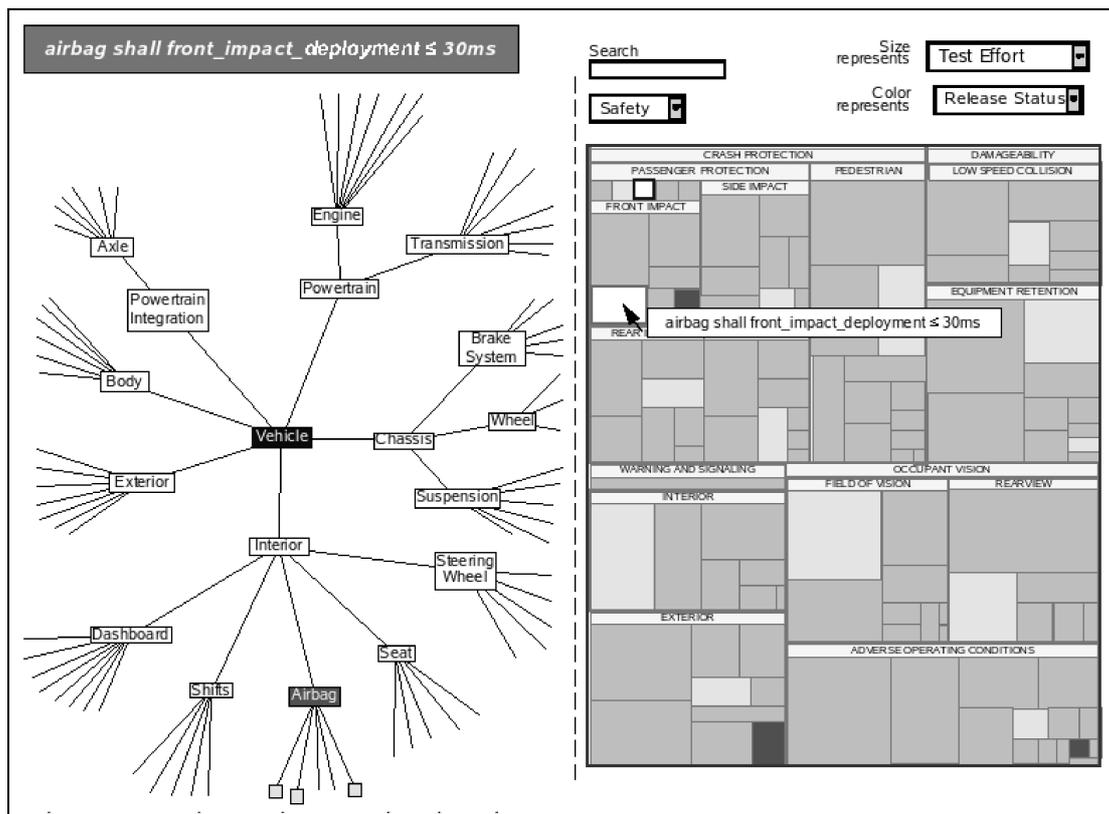


Abbildung 47: Hyperbolic Tree verknüpft mit Tree Map (Beispiel, Quelle: [Muel-06])

## 4.5 Zusammenfassung

Kapitel 4 behandelte die theoretische Umsetzung des Anforderungsmodells. Schwerpunkt war der erstmalige Aufbau einer Produkt-DNA, der sogenannten Initialen Produkt-DNA. Die notwendigen Voraussetzungen hierzu wurden in einer Richtlinie festgelegt. Zur Aufbereitung der Anforderungen reicht die Normalisierung nicht aus. Daher werden die Anforderungen skelettiert, das heißt, sie werden reduziert auf Begriffe aus einem domänenspezifischen Begriffssystem. Hinsichtlich der Schreibweise von skelettierten Anforderungen wurde eigens eine Notation entwickelt. Die Begriffe einer Produkt-DNA müssen aus einem generischen Begriffssystem stammen. Dieses besteht aus sogenannten Begriffskatalogen für Produktelemente, Nicht-Produktelemente, Gewichtung sowie Eigenschaften und Merkmale. Die Methodik zur Erstellung der Initialen Produkt-DNA wurde beispielhaft aufgezeigt. Als problematisch wurde der Umgang mit Produkt-elementvarianten erkannt und zwei konträre Lösungsansätze vorgestellt.

Das Anforderungsmodell geht über die klassische Handhabung von Anforderungen hinaus, da bestimmte Anforderungselemente „aktiv“ am Produktentwicklungsprozess teilnehmen und so dem Anwender einen Teil der administrativen Arbeit

abnehmen. Die Anforderungselemente PE, nPE, P, F besitzen dazu Elementfunktionen. Diese wurden in vier Funktionsgruppen zusammengefasst: Manipulation, Konsistenz, Kommunikation und Verwaltung.

Für die konkrete Umsetzung des Anforderungsmodells wurden einige grundsätzliche Überlegungen angestellt. So wurden die Begriffe als Klassen im Sinne der Objektorientierten Programmierung vorgeschlagen. Das bedeutet, dass in der Produkt-DNA nur Instanzen der Bezeichner aus den Begriffskatalogen verwendet werden.

Weiterhin wurde als eine Maßnahme zur Reduzierung der Komplexität auf Grund der hohen Anzahl von Anforderungselementen die Anwendung verschiedener Sichten auf die P-DNA vorgeschlagen. Zum einen generische Sichten, die durch die Struktur der Begriffskataloge vorgegeben sind und unternehmensweit eine einheitliche Sicht auf Produktelemente und deren Eigenschaften und Merkmale garantieren, und zum anderen zweckspezifische Sichten, die innerhalb von Organisationsbereichen für eine bestimmte Aufgabe erstellt werden.

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung der Komplexität an der Schnittstelle zum Menschen sind geeignete Darstellungsformen. Drei grundlegende Darstellungsformen für eine Anwenderschnittstelle wurden angedacht: die tabellarische Präsentation, die Visualisierung unter Verwendung der Geometriedaten oder Nutzung von Tree Maps in Kombination mit Hyperbolic Trees.

## 5 Verifikation

Die Überprüfung des Modells kann nach Meinung des Autors zufriedenstellende Aussagen nur im Rahmen eines realen Fahrzeugprojektes liefern. Da keine unternehmensspezifischen oder auftragsspezifischen Daten vorlagen, musste die Datenbasis nach Angaben von Zulieferern und der Erfahrung des Autor im Automobilbau erstellt werden.

Es wurden mehr oder weniger fiktive Anforderungen an das Fahrzeug als auch einige funktional unabhängige Systeme herangezogen. Dazu gehören, der Schalthebelzusammenbau, der Ölfilter, das Belüftungssystem, die Abgasanlage und das Fangnetz um nur einige zu nennen.

Ein zukünftige Implementierung des Modells in ein IT-System und die Einführung in den Fahrzeugentwicklungsprozess ist nur dann sinnvoll, wenn sich die heutigen Anforderungen in skelettierte Produkthanforderungen umsetzen lassen. Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt der Verifikation auf der Überführung verbaler Anforderungen, meist Textabsätze oder einzelne Sätze, in die Notation für Produkt- und Schnittstellenanforderungen (Seite 111).

Hinsichtlich des Ergebnisses sei gesagt, dass sich nahezu alle Produkthanforderungen in der vorgegebenem Notation schreiben lassen. Allerdings ergaben sich auch neue Erkenntnisse, die im Nachfolgenden thematisch aufgelistet und mit Beispielen unterlegt sind. Die Themenpunkte sind hierbei so aufgebaut, dass zuerst die Beobachtung steht, danach die Problematik in Hinblick auf Skelettierung beziehungsweise das Anforderungsmodell und zuletzt Vorschläge, wie dem zu begegnen ist.

### 5.1 Anforderungen ohne genaue Nennung des Produktelements

Nicht selten treten Anforderungen auf, bei denen das Produktelement nicht genauer benannt wurde. Ein Beispiel für eine solche Anforderung ist:

## Beispiel 5.1:

„Alle Subsysteme, welche Flüssigkeiten beinhalten, müssen mit Ablassvorrichtungen versehen sein“

Da die betroffenen Systeme unter Umständen nicht alle bekannt sind, kann es sein, dass diese Anforderung für manche Systeme vergessen wird. Zudem ist eine solche Anforderung in der vorgeschlagenen Produkt-DNA nicht vorgesehen. Falls es bei der Erfassung noch nicht möglich ist, nähere Angaben vom Anforderungssteller zu erhalten, wäre ein Vorschlag, diese Anforderung über ein „Dummy-Produktelement“ in der P-DNA zu verankern und in mehr oder minder regelmäßigen Reviews die vorhandenen Produktelemente zu prüfen, ob diese von dieser Anforderung betroffen sind.

## Lösungsvorschlag Beispiel 5.1:

$$R_{pe} := PE.Subsystem \oplus$$

$$I: \text{“muss“} \oplus$$

$$pe.Ablassvorrichtung$$

$$($$

$$C(PF.Inhaltskonsistenz: \text{“flüssig“})$$

$$)$$

Das „Dummy-Produktelement“ (hier: PE.Subsystem) kann wieder aus der P-DNA entfernt werden, wenn garantiert ist, dass es und dessen Eigenschaften und Merkmale in der entsprechenden P-DNA berücksichtigt wurde. Denkbar ist, dass eine Elementfunktion den Anwender bei der Suche potentieller Produktelemente innerhalb der P-DNA unterstützt, in welche die Anforderung eingebaut werden muss.

Während im Beispiel 5.1 das Produktelement PE nicht näher bestimmt ist, gibt es noch die Variante bei der, im Falle von Lösungsanforderungen, das Produktelement pe nicht spezifiziert ist.

## Beispiel 5.2:

„Der Austausch des Ölfilters muss ohne das Entfernen anderer Komponenten möglich sein“

Auch in diesem Beispiel fällt es schwer eine formale Beschreibung zu finden da die „anderen Komponenten“ nicht näher spezifiziert sind. Als Lösungsvorschlag wird ebenfalls die Verwendung des „Dummy-Produktelements“ vorgeschlagen.

Lösungsvorschlag Beispiel 5.2:

$R_{PF} := PE.Ölfilter \oplus$

I: „muss“  $\oplus$

PF.Wartung.Austauschbarkeit.Freigängigkeit(PE.Subsystem)

Die Eigenschaft „Freigängigkeit“ darf allerdings erst den Basiszustand „approved“ einnehmen, wenn die Subsysteme definiert sind (Basiszustände siehe auch Tabelle 4, Seite 93).

Die dritte Art von Anforderungen, bei denen die konkrete Angabe des Produktelements fehlt, stammen aus Anforderungen an die Umgebung von Produktelementen. Auch hierbei liegt die Schwierigkeit darin, die Anforderung in die formale Schreibweise des Modells zu überführen.

Beispiel 5.3:

„Der Motorraum muss so ausgelegt sein, dass man ungehindert Flüssigkeiten in die entsprechenden Behältnisse einfüllen kann“

Der Motorraum gehört der Umgebung (oder Umwelt) an und ist kein Produktelement. Solche Anforderungen müssen in Anforderungen, die das Produkt betreffen, umformuliert.

Lösungsvorschlag für Beispiel 5.3:

$R_{PF} := PE.Subsystem \oplus$   
 $I: \text{“muss“} \oplus$   
 PF.Befüllbarkeit  
 (  
   C(PF.Inhaltskonsistenz: “flüssig“),  
   C(nPE.Umwelt.Motorraum)  
 ): “ungehindert“

## 5.2 Aufzählungen

Es gibt Spezifikationen, in denen Aufzählungen von Anforderungselementen in Anforderungen vorkommen.

Beispiel 5.4:

„Das Fahrzeug muss in Europa, Japan und USA verkauft werden“

Beispiel 5.5:

„Der Schalthebelzusammenbau muss die Schaltpositionen P, R, N, D, S einnehmen“

Beispiel 5.6:

„Folgende Leuchten müssen der Vorschrift 76/756/EEC genügen:

Zusatzbremsleuchte

Nebelleuchten vorne und hinten

Bremsleuchten

Parkleuchten

Abblendscheinwerfer“

Aufzählungen sind derzeit in den beiden Notationen nicht vorgesehen. Diese müssten erweitert werden, dass skelettierte Produktanforderungen auch Wertemengen mit aufnehmen.

Lösungsvorschlag zu Beispiel 5.4:

$R_{PF} := PE.Fahrzeug \oplus$   
 I: "muss"  $\oplus$   
 PF.verkaufbar(C(nPE.Umwelt.Markt: "Europa", "Japan", "USA"))

Lösungsvorschlag zu Beispiel 5.5:

$R_{PF} := PE.Schalthebelzusammenbau \oplus$   
 I: "muss"  $\oplus$   
 PF.Schaltposition: "P", "R", "N", "D", "S"

Für Beispiel 5.6 ist eine vergleichbare Schreibweise nicht sinnvoll. Die Anforderungen sind einzeln im Sinne von Lösungsvorschlag 5.6 aufzulisten.

Lösungsvorschlag Beispiel 5.6:

$R_{PF} := PE.Zusatzbremsleuchte \oplus$   
 I: "muss"  $\oplus$   
 PF.Signalfunktion\_optisch(C(RD: "76/756/EEC"))

### 5.3 Eigenschaften oder Merkmale außerhalb der P-DNA

Es gibt eine Sorte von Anforderungen, bei denen zwei Produktelemente in Beziehung zueinander stehen, jedoch die Eigenschaft oder das Merkmal scheinbar zur Umwelt gehört.

Beispiel 5.7:

„Die Spaltbreite zwischen der Seitentür vorne und der B-Säule soll 5 mm betragen“

Im Beispiel 5.7 gehört das Merkmal „Spaltbreite“ weder zur Seitentür noch zur A-Säule. Streng genommen ist die (Spalt-)breite ein Merkmal des Luftspalts und somit Teil der Umwelt des Produkts.

Als Lösung dieser Problematik wird vorgeschlagen, schon bei der Erfassung der Anforderung, ein den beiden Produktelementen gemeinsames Merkmal (oder eine Eigenschaft) zu benennen, so dass die Anforderung als Schnittstellenanforderung ausgelegt werden kann.

Lösungsvorschlag Beispiel 5.7:

$L_{PF} := PE.Seitentür\_vorne \oplus$   
 $I: "soll" \oplus$   
 $PF.Lage.Nachbarschaft.Abstand: = 5 [mm] \oplus$   
 $PE.B\_Säule$

## 5.4 Anbau- oder Zubehörteile

Für die virtuelle oder auch physische Integration müssen schon während der Produktdefinition Vorrichtungen (zum Beispiel Halterungen) berücksichtigt werden. Dies gilt für das Produkt im Allgemeinen und für Anbau- oder Zubehörteile im Speziellen. Die Frage, die sich ergibt ist: Wie behandelt man solche Teile in der P-DNA?

Beispiel 5.8:

„Für das Fangnetz im Laderaum müssen Haltevorrichtungen in der Karosserie vorgesehen werden“

Lösungsvorschlag Beispiel 5.8:

$L_{PF} := PE.Karosserie \oplus$   
 $I: "soll" \oplus$   
 $PF.mechanisch \oplus$   
 $PE.Fangnetz$

Die Implementierung des Lösungsvorschlag in Beispiel 5.8 setzt voraus, dass beide Produktelemente, Karosserie und Fangnetz, in der P-DNA angelegt wurden. Die Verwendung von Anbau- oder Zubehörteilen ist jedoch abhängig von der Produktkonfiguration. Für das Anforderungsmodell bedeutet dies, dass zusätzliche Mechanismen etabliert werden müssen, die verhindern, dass bei Aktivieren oder Deaktivieren von besagten Produktelementen die P-DNA „instabil“ wird.

## 5.5 Modellierung in Abhängigkeit vom Verifikationsergebnis

Produktdefinition, Konstruktion und Verifikation/Validation beeinflussen sich gegenseitig. So können Validationsergebnisse auf die Anforderungsdefinition rückwirken.

Beispiel 5.9:

„Falls der Geräuscheinfluss der Abgasanlage zu einer Überschreitung des Innenraumgeräuschpegels von 34 dB(A) führt, sind zusätzliche Schallreflektoren zu installieren“

Diese Art von Anforderung kann schon lange vor dem ersten verifikationsfähigen Prototypen gefordert sein. Bleibt die Frage: Ist es sinnvoll, diese Anforderung in der P-DNA zu implementieren? Entscheidet man sich für die frühzeitige Implementierung, dann muss das betroffene Produktelement (im Beispiel: Schallreflektor) vorerst in einen inaktiven Zustand versetzt werden. Nur bei Nichterfüllung der Anforderung darf die technische Lösung (hier: Schallreflektor) aktiviert werden.

## 5.6 Umgebung

Das Anforderungsmodell dient in erster Linie zur Beschreibung der Produktelemente und deren Eigenschaften und Merkmale. Da die Produktauslegung auch durch die Umwelt beeinflusst wird, wurde das sogenannte Nicht-Produktelement (nPE) in das Modell mit aufgenommen. Dazu zählen zum Beispiel der Markt, die Crashbarriere, die Straße, aber auch der Innenraum, der Kofferraum oder die

Außenwelt. Schwierigkeiten in der formalen Beschreibung können dann auftreten, wenn Eigenschaften oder Merkmale der Umgebung das Entwicklungsziel darstellen.

Beispiel 5.10:

„Bei eingeschaltetem Belüftungssystem darf die Innenraumtemperatur nicht höher als 6 °C gegenüber der Außentemperatur sein, bei einer Außentemperatur von 25 °C, ohne Sonneneinstrahlung und dunkler Innenausstattung“

Entwicklungsziel ist die Temperatur im Innenraum, das heißt ein Merkmal eines Nicht-Produktelements.

Sowohl der Innenraum als auch die Außenwelt sind Nicht-Produktelemente. Diese Anforderung lässt sich nicht streng als skelettierte Produkthanforderung schreiben.

Lösungsvorschlag Beispiel 5.10:

```

RPF := PE.Fahrzeug ⊕
      I:“muss“ ⊕
      PF.Temperatur_Innenraum
      (
        C(PE.Belüftungssystem,PF.Betriebszustand:"eingeschaltet"),
        C(nPE.Umgebung.Außenwelt, PF.Temperatur: = 25 [°C]),
        C(nPE.Umgebung.Außenwelt, PF.Sonneneinstrahlung: = 0 [W/(m*m)])
        C(nPE.Umgebung.Innenraum, PF.Design:"dunkel")
      ): <= 31 [°C]

```

Der Lösungsvorschlag 5.10 bietet einen pragmatischen Ansatz. Er erlaubt ein „Merkmal“ (hier: Temperatur\_Innenraum), das eine Komposition aus Merkmal und Nicht-Produktelement darstellt und als Merkmal des Fahrzeugs zu interpretieren ist. Solche Notlösungen sollten möglichst vermieden werden, um den Vorteil semantisch voneinander entkoppelter Anforderungselemente nicht zu verlieren.

## 6 Ergebnisse und offene Punkte

Die vorliegende Arbeit liefert eine Methodik einschließlich eines Anforderungsmodells für ein integratives Anforderungsmanagement. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Ergebnisse noch einmal zusammengefasst. Offene Punkte aus dem darauf folgenden Kapitel können für weitere Forschungsarbeiten herangezogen werden.

### 6.1 Ergebnisse

Zu Beginn der Arbeit wurden Forderungen an ein Anforderungsmodell gestellt. Inwieweit diese Forderungen theoretisch erfüllt werden, soll nun im Einzelnen dargelegt werden.

Forderung 1:

Das Modell muss die Entstehung von Semantik im Kontext von Produktanforderungen unterstützen.

Anforderungen im Allgemeinen und Produktanforderungen im Speziellen liegen in unterschiedlichen Formen vor (zum Beispiel: Dokumente, Texte, Graphiken, Tabellen). Im Rahmen dieser Arbeit wurden vorzugsweise Produktanforderungen betrachtet, die als Texte vorliegen. Die Interpretation von Anforderungen geschieht durch den Menschen und kann von Mensch zu Mensch unterschiedlich sein. Fehlinterpretationen entstehen durch unvollständige Anforderungen, Mehrdeutigkeiten oder durch unterschiedliche Begriffswelten. Um dem zu begegnen, wurden mehrere Maßnahmen getroffen.

So wurden gewöhnliche Anforderungen über ein zweistufiges Verfahren (Normalisierung, Skelettierung) zerlegt und in eine standardisierte Form gebracht. Für die Bestandteile der Anforderungen wurde die Einführung von Katalogen aus dem Begriffssystem einer Domäne für zu verwendende Begriffe vorgeschlagen. Zudem wird die Verwendung von Synonymen durch die Festlegung von Bezugsbegriffen unterbunden.

Semantik entsteht unter anderem durch Zusammenhänge. Das Modell unterstützt die Semantik von Anforderungen unter anderem dadurch, dass Beziehungen zwischen Anforderungselementen mit betrachtet werden (zum Beispiel: Ableitungen, Cross Links). So liefert eine Ableitungen die Begründung für die Erstellung einer Anforderung.

**Forderung 2:**

Das Modell muss zur Verbesserung der Durchgängigkeit der Produktdaten innerhalb des Produktentwicklungsprozesses beitragen.

Die heutigen IT-Systeme sind, historisch bedingt, aufgaben- und zweckorientiert. Jedes IT-System nutzt seine, und meist nur seine Sicht auf das Produkt. Eine Durchgängigkeit der Produktdaten über den gesamten Entwicklungsprozess ist nur schwer mit den gängigen Ansätzen (zum Beispiel: STEP) realisierbar. Das vorliegende Anforderungsmodell trägt zu einer Verbesserung der Durchgängigkeit in dreierlei Hinsicht bei:

Erstens werden die Daten zu einem Produktelement immer in den Produktelementen vorgehalten und nicht, wie in der klassischen Datenhaltung, Teile der Daten zu einem Produktelement in verschiedenen Systemen<sup>83</sup>.

Zweitens unterstützt das Modell beide Äste des V-Modells, das heißt sowohl die Definition des Produktes von Produktebene in Richtung Teileebene (Top-down-Ansatz) als auch die Integration von Teileebene in Richtung Produktebene (Bottom-up-Ansatz).

Drittens erlaubt das Modell sowohl den Umgang mit qualitativen als auch mit quantitativen Anforderungen.

**Forderung 3:**

Das Modell muss neben Produkthanforderungen auch (existierende) technische Lösungen berücksichtigen.

Mit technischen Lösungen sind hier vorhandene Ausprägungen von Produktelementen gemeint. Da die Entwicklungszustände im Modell den Reifegrad des Produktes anzeigen, deckt es auch technische Lösungen ab, denn technische Lösungen sind Produktelemente in einem „sehr hohen“ Reifegrad (oft fertig entwickelte Produktbestandteile). Um schon existierende Produktbestandteile (zum Beispiel: Zukaufteile) in die P-DNA einbauen zu können, müssen diese Produktbestandteile hinsichtlich ihrer Eigenschaften, Merkmale und Schnittstellen beschrieben werden. Damit unterstützt das Modell die Integration von existierenden technischen Lösungen und die Aufdeckung von Inkompatibilitäten.

---

<sup>83</sup> Gemeint ist, dass die Daten logisch und nicht unbedingt physisch in den Produktelementen vorliegen müssen.

---

**Forderung 4:**

Das Anforderungsmodell soll aus „wenigen“ Grundbestandteilen bestehen.

Diese Forderung resultiert aus der Suche nach Parallelen zwischen der Entstehung von Lebewesen und der Entstehung von technischen Produkten. Etwas Vergleichbares wie die 4 bzw. 5 Basen, welche die Grundbausteine des biologischen Bauplans (DNA) in Organismen bilden, gibt es in der Produktentwicklung nicht. Allerdings wurden über die Normalisierung Produkt- und Schnittstellenanforderungen in wenige Anforderungselemente, genauer acht (PE, nPE, I, P, F, C, TP und RD), semantisch zerlegt.

**Forderung 5:**

Die Information über den strukturellen Aufbau sowie die zeitliche Information über die Produktentwicklung sollen zentral vorgehalten werden.

Pro Produkt gibt es nach dem vorgeschlagenen Anforderungsmodell jeweils eine Produkt-DNA. Sie ist der logische zentrale Ort für (theoretisch) alle Produktinformationen. Über die Vernetzung der Anforderungselemente PE, P und F über die Ableitungen und Cross Links verkörpert die Produkt-DNA den strukturellen Aufbau des Produktes. Die zeitliche Information definiert sich über die Entwicklungszustände der Produktelemente. Versieht man die Anforderungselemente Produktelement, Merkmale und Eigenschaften zusätzlich noch mit zeitlichen Planungsdaten, so lässt sich theoretisch das Produktwachstum über die Zeit planen und verfolgen.

**Forderung 6:**

Es soll im Modell funktionale Einheiten geben, welche Charakteristika des Produktes sowohl beinhalten als auch verkörpern.

Bei der Betrachtung von funktionalen Einheiten lassen sich zwei Standpunkte einnehmen. Vom Standpunkt des Produktes bilden die Produktelemente die funktionalen Einheiten. Sie erfüllen Teilfunktionen des Produktes bzw. den Zweck, für den sie entwickelt werden. Das Produktelement Fensterheber zum Beispiel erfüllt die Funktion, elektrische Energie in mechanische Energie umzuwandeln zum Zweck

das Seitenfenster herunter- bzw. hochzufahren. Vom Standpunkt des Projektmanagements sind neben den Produktelementen auch Eigenschaften und Merkmale funktionale Einheiten, weil sie sowohl innerhalb des Produktorganismus als auch über dessen Grenzen hinaus kommunizieren. Der Zweck hierbei ist, dass sie dem Menschen einen Teil der administrativen Tätigkeit abnehmen.

#### Forderung 7:

Die funktionalen Einheiten sollen die Vorgänge der Produktentstehung unterstützen.

Wie im letzten Abschnitt bereits beschrieben, bilden im Modell die Anforderungselemente PE, P und F die funktionalen Einheiten im Produktorganismus. Sie ermöglichen es, über die sogenannten Elementfunktionen mit anderen Anforderungselementen (PE, P und F) zu kommunizieren. Darüber hinaus ermöglichen sie die Kommunikation mit der Umwelt.

Die Elementfunktionen unterstützen die Bewältigung von Aufgaben aus folgenden vier Themengebieten:

- Manipulation von Anforderungselementen in der Produkt-DNA
- Kommunikation zwischen den Anforderungselementen oder mit der Umwelt
- Konsistenz der Anforderungselemente in sich und in der Produkt-DNA
- Verwaltung der Daten

#### Forderung 8:

Die funktionalen Einheiten des Modells sollen die Fähigkeit der Differenzierung besitzen.

Die funktionalen Einheiten Produktelemente, Merkmale und Eigenschaften besitzen nicht die Fähigkeit der Differenzierung. Da sie aber aus IT-Sicht sehr viele Gemeinsamkeiten aufweisen, wurde für die Realisierung des Anforderungsmodell eine objektorientierte, hierarchische Klassenstruktur vorgeschlagen. An dessen Wurzel

befindet sich das sogenannte Informationsobjekt, aus dem durch zweimalige Vererbung die Klassen der drei Anforderungselemente hervorgehen. Insofern kann dies auch als eine Art Differenzierung gesehen werden.

Forderung 9:

Das Modell soll grundsätzlich übereinstimmende (homologe) Merkmale berücksichtigen.

Die Natur sieht bei höheren Lebewesen, die sich geschlechtlich fortpflanzen, die Möglichkeit vor, über homologe Merkmale Varianten zu bilden. Im Anforderungsmodell wurde ebenfalls die Anwendung ähnlicher Merkmale vorgesehen. Varianten von Merkmalen führen im Anforderungsmodell zu Varianten von Produktelementen.

Neben der Beurteilung der Forderung an das Modell lassen sich folgende weitere Detailergebnisse dieser Arbeit aufzeigen:

### **Identifikation von Produktbestandteilen**

Während in der heutigen Produktentwicklung Produktbestandteile erst mit der Vergabe von Teilenummern im Rahmen der Konstruktion eindeutig identifiziert werden können, liefert das Modell über die Produktelemente die eindeutige Identifikation schon ab dem Zeitpunkt der Anforderungsdefinition.

### **Prozessplanung**

Sofern bei der Erfassung von Eigenschafts- und Merkmalsanforderungen konsequent die Prüfvorschriften abgefragt werden, kann eine frühere und folglich bessere Prototypen- und Simulationsplanung erfolgen.

### **Projektverfolgung**

Da sowohl die Produktelemente als auch die Eigenschaften und Merkmale nach dem Modell zustandsbehaftet sind, lässt sich der Entwicklungsstand des Produktes zu jedem Zeitpunkt angeben.

Werden im Rahmen eines Projektes mehrere Fahrzeugvarianten entwickelt, so liefert die Zustandsverfolgung der Anforderungselemente PE, P und F die Basis für eine qualitativ hochwertige Architekturbeschreibung des Fahrzeugs.

### **Transparenz**

Während heute üblicherweise die Anforderungen mehr oder weniger thematisch voneinander getrennt erfasst werden (Marketing, Technik, Fertigung etc.), befinden sich die Anforderungen im vorliegenden Modell gleichberechtigt an der dafür vorgesehenen Stelle, das heißt, die zu einem Produktelement gehörenden Eigenschaften und Merkmale befinden sich innerhalb der Produktelemente.

Sowohl generische als auch zweckspezifische Sichten erlauben die Betrachtung des Produktes und seiner Bestandteile aus planerischer, organisatorischer und produktbezogener Perspektive.

Durch die verschiedenen Beziehungsarten wird das „Umfeld“ eines Produktelements transparenter.

### **Balancing**

Das Modell kann zu einer Verbesserung des Balancing<sup>84</sup> Prozesses beitragen. Neben den verschiedenen Interessen der technischen Organisationsbereiche dominiert in der heutigen Automobilentwicklung der grundsätzliche Interessenkonflikt zwischen der technischen Machbarkeit und der Finanzierbarkeit. Da das Modell sowohl technische als auch finanzielle Eigenschaften und Merkmale und auch deren Beziehungen berücksichtigt, können die Konsequenzen bei der Entscheidungsfindung besser abgeschätzt werden.

Zu den Ergebnissen zählen auch die Erkenntnisse aus der Verifikation (Kapitel 5). Dort wurde geprüft, in wie weit sich die vorgeschlagene Notation zur Beschreibung von Produkt- und Schnittstellenanforderungen eignet. In den meisten Fällen lassen sich Anforderungen in das vorgegebene Schema überführen und darstellen. Die Grenzfälle wurden in Kapitel 5 thematisch zusammengefasst und mit einem Beispiel inklusive Lösungsvorschlag aufgeführt.

---

<sup>84</sup> Balancing bezeichnet im Anforderungsmanagement den Vorgang der Kompromissfindung bei konkurrierenden Anforderungen

## 6.2 Offene Punkte

Die nachfolgenden Punkte wurden zwar im Rahmen dieser Arbeit angedacht, doch bedarf es noch vertiefende Untersuchungen in den entsprechenden Themen.

### Varianten

Das Modell ist vielversprechend für die Entwicklung eines Produktes in genau einer Konfiguration. In Kapitel 4.2.3 wurde jedoch schon auf die Variantenproblematik eingegangen und dafür zwei konträre Lösungsansätze gemacht. Der Produktorganismus ist für die Entwicklung genau eines „Individuums“ ausgerichtet. Deshalb darf in der Produkt-DNA zu jedem Zeitpunkt nur genau eine Variante eines Produktelements aktiv sein. Varianten können auf Grund von Beziehungen zu anderen Produktelementen zu Instabilitäten des Produktorganismus führen. Es muss deshalb noch genauer untersucht werden, wann es zulässig ist, Varianten innerhalb eines Produktorganismus gegeneinander auszutauschen oder wann es dagegen notwendig ist, einen weiteren Produktorganismus anzulegen.

### Visualisierung

Dieser Punkt betrifft zwar nicht direkt das Anforderungsmodell, ist jedoch für dessen Umsetzung von elementarer Bedeutung. Damit ein künftiges System von den Anwendern akzeptiert wird, muss die Anwenderschnittstelle benutzerfreundlich gestaltet werden. Ein wichtiger Punkt in diesem Zusammenhang ist die Visualisierung von Informationen der Produkt-DNA. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden erste Untersuchungen angestellt [Muel-06]. Trotzdem muss dieses Thema weiter intensiv untersucht werden.

### Modellintegration

Im Idealfall ist die Produkt-DNA der Ort, an dem alle Daten, die das Produkt betreffen, verankert sind. In Abhängigkeit von den Ergebnissen des noch zu entwickelnden Prototyps muss über die schrittweise Verlagerung bestimmter Daten der bestehenden IT-Systeme (zum Beispiel: PDM-, CAD-, Organisationssysteme) in die Produkt-DNA nachgedacht werden.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die heutige Produktentwicklung zeigt immer noch massive Schwächen in Bezug auf die Durchgängigkeit der Produktdaten. Insbesondere in der frühen Phase der Produktentwicklung, in der die Datenqualität als zu gering einzustufen ist, und des Weiteren die Daten einer hohen Änderungsdynamik unterliegen. PDM-Systeme sollen diese Schwäche langfristig beseitigen, doch liegt der Schwerpunkt heutiger PDM-Systeme noch immer auf den Produktdaten – beginnend mit der Konstruktionsphase. Dagegen erfährt die frühe Phase der Produktentwicklung noch immer recht wenig Unterstützung. In dieser Phase findet die Produktdefinition statt, und es gibt einige etablierte RM-Systeme auf dem Markt ([Inco-07], [Hood-07]), die sich jedoch immer noch wie Insellösungen zum Rest der IT-Infrastruktur in den Automobilunternehmen verhalten.

Die wesentliche Ursache für eine mangelnde Durchgängigkeit der Produktdaten ist historisch bedingt und liegt im Zweck der existierenden IT-Systeme begründet. Die vorhandenen IT-Systeme sind für bestimmte Aufgaben konzipiert und behandeln folglich nur einen Teilaspekt des Produktes. Jedes IT-System gibt gemäß seiner Bestimmung die Sicht auf den entsprechenden Produktdatenanteil vor, und die Daten werden auch dementsprechend abgelegt. Was immer noch fehlt, ist eine Metaebene, welche die Produktdatenanteile über den gesamten Entwicklungsprozess logisch zusammenhält.

Eine weitere Schwierigkeit liegt im Anforderungsmanagement an sich. So ist es bis heute noch nicht möglich, einem IT-System die Semantik der Produkthanforderungen zu vermitteln. Man hat die Notwendigkeit hierfür erkannt und auch schon in neueren Veröffentlichungen Lösungsansätze aufgezeigt. Diese Ansätze stützen sich auf Wortnetze und Ontologien.

Die vorliegende Arbeit liefert einen Entwurf für ein integratives Anforderungsmodell. Der Fokus liegt hierbei auf dem Begriff Anforderungsmanagement, der sowohl die Prozesse der Erstellung von Produkthanforderungen als auch deren Beurteilung und Verfolgung beinhaltet. Hierzu wird ein Anforderungsmodell vorgestellt, welches beschreibt, in welcher Form Anforderungen vorliegen sollen und wie diese untereinander in Beziehung stehen. Darüber hinaus wird die Vorgehensweise zur Umsetzung des Modells aufgezeigt.

Anforderungsmanagement im Rahmen des Konzepts verhält sich „integrativ“, das heißt, es soll nicht als „integrierter“ Bestandteil des Entwicklungsprozesses verstanden werden, sondern als eine die Integration von Prozess- und Produktbestandteilen fördernde bzw. darauf abzielende Vorgehensweise. Als Anwendungsgebiet wurde die Automobilindustrie gewählt, in deren Entwicklungsprozessen die

Durchgängigkeit der Produktdaten noch erhebliches Optimierungspotential besitzt und wo außerdem, speziell in der Definitionsphase, nahezu keine in sich konsistente Anforderungsstruktur anzutreffen ist.

Das Anforderungsmodell wurde in mehreren Schritten erstellt. Dazu wurde der Stand der Technik erörtert und bestehende Ansätze für das Anforderungsmanagement kritisch untersucht. Aus der Analyse resultierten Forderungen an das Modell dahingehend, dass eine Verbesserung in der Berücksichtigung von Semantik, der Produktdatendurchgängigkeit und die Einbindung existierender technischer Lösungen erwartet wird. Die Einbindung existierender technischer Lösungen resultiert aus der Notwendigkeit, diese schon bei der Anforderungsdefinition mit zu berücksichtigen (Hintergrund: heutzutage werden häufig immer noch Produkthanforderung und Stücklisten unabhängig voneinander erstellt).

Im nächsten Schritt wurde die Terminologie aus dem Anforderungsmanagement in Hinblick auf das Modell angepasst und erweitert.

Um Produkthanforderungen und Schnittstellenanforderungen in eine IT-verarbeitbare Form zu bringen, wurde ein zweistufiges Verfahren vorgeschlagen. Im ersten Schritt werden dazu gewöhnliche, als Text vorliegende Anforderungen in Anforderungen mit jeweils genau drei semantischen Anteilen überführt (Normalisierung). Im zweiten Schritt werden diese Anteile auf domänenspezifische Begriffe reduziert (Skelettierung). Die Verfahren berücksichtigen sowohl qualitative, quantitative als auch Produkthanforderungen mit technischen Lösungen.

Zur Formalisierung der Anforderungen wurde eigens eine Notation entwickelt und zur graphischen Darstellung eine entsprechende Symbolik eingeführt.

Da die bestehenden Ansätze keine befriedigenden Lösungen für eine durchgängige Produktentwicklung liefern, wurde ein Exkurs in die Biologie unternommen. Es wurde nach Parallelen der Produktentwicklung zu den in der Natur wichtigen Themen Evolution, Wachstum und den Ort des Bauplans (DNA) gesucht. Zwar konnten keine direkten Vergleiche zwischen der Entstehung von Organismen in der Natur und der Produktentwicklung im Automobilbau gefunden werden, jedoch führten die Betrachtungen zu einer neuen Sichtweise in Bezug auf die Entstehung technischer Produkte. Daraus resultieren weitere Forderungen an das Anforderungsmodell.

Mit der neuen bzw. angepassten Terminologie, der Normalisierung und Skelettierung von Produkthanforderungen und den Erkenntnissen aus der Natur wurde anschließend ein Anforderungsmodell entwickelt. Das Modell berücksichtigt sowohl die Zunahme an Eigenschaften und Merkmalen des Produktes (Produkt-evolution) als auch die Ausprägung der Produktelemente (Produktwachstum). Beide Prozesse überlagern sich und erstrecken sich über den gesamten Entwicklungsprozess, beginnend mit den ersten Produkthanforderungen bis hin zum Start der Serienproduktion. Für den logischen Träger aller Produktelemente, deren Eigen-

schaften und Merkmale sowie deren Beziehungen untereinander, die zur Entwicklung des Produktes notwendig sind, wurde der Begriff Produkt-DNA eingeführt.

Die zentralen Anforderungselemente im Modell bilden die Produktelemente sowie ihre Eigenschaften und Merkmale. Diese stehen in Beziehungen zueinander. Es wurde zwischen vier verschiedenen Arten von Beziehungen unterschieden:

Ableitungen dienen der Detaillierung und Präzisierung von Produkthanforderung. Sie bilden die vertikale Vernetzung in der Produkt-DNA und stellen die Rückverfolgbarkeit der Anforderungen sicher.

Cross Links sind Beziehungen zwischen Produktelementen, welche die Funktion der Produktelemente im Verbund gewährleisten. Sie bilden die horizontale Vernetzung in der Produkt-DNA.

Abhängigkeiten beschreiben die Wechselwirkung zwischen Eigenschaften oder Merkmalen. Es wird zwischen mathematischen und nicht-mathematischen Abhängigkeiten unterschieden.

Randbedingungen besitzen eine Doppelrolle. Zum einen sind sie Einschränkungen der Eigenschaften, der Merkmale oder der existierenden Lösungen innerhalb von Produkthanforderungen. Sie können jedoch auch als Beziehungen angesehen werden, da sie zum Teil auch durch Anforderungselemente, die außerhalb der Produkthanforderung liegen, bestimmt werden.

Über die Produkt-DNA hinaus wurde das Anforderungsmodell um einen aktiven Anteil – die Elementfunktionen – ergänzt. Elementfunktionen sind Funktionen zur Verarbeitung von produktinternen oder -externen Reizen. Sie übernehmen Aufgaben zur Manipulation, Konsistenzsicherung, Kommunikation und Verwaltung von Produktelementen und deren Eigenschaften und Merkmalen.

Die Produkt-DNA als passiver Anteil in Verbindung mit den Elementfunktionen als aktiver Anteil im Anforderungsmodell wird als Produktorganismus bezeichnet.

Im Gegensatz zu den existierenden Methoden im Anforderungsmanagement nimmt im aufgezeigten Anforderungsmodell auf Grund der feineren Informationsgranularität die Komplexität hinsichtlich der Anzahl der beteiligten Elemente und deren Vernetzung zu. Um dem zu begegnen, wurden zwei Lösungswege aufgezeigt. Zum einen über Strukturierungsmaßnahmen, die prozessspezifische Sichten auf die Produkt-DNA ermöglichen, und zum anderen über graphische Visualisierung. Letzteres wurde im Rahmen einer Diplomarbeit

näher untersucht. Hierin wurde eine Kombination aus zwei existierenden Darstellungswerkzeugen (Tree Maps und Hyperbolic Trees) zur Wahrung der Übersicht und für die Navigation in der Produkt-DNA herangezogen.

Die Beherrschung von Varianten stellt eine weitere Herausforderung in der heutigen Produktentwicklung dar. Für das Anforderungsmodell wurden zwei konträre Lösungsansätze aufgezeigt. Der erste Ansatz sieht die Verwendung von Varianten innerhalb ein und demselben Produktorganismus vor. Der zweite Ansatz fordert in Falle von Varianten die Erzeugung eines neuen Produktorganismus.

Die technische Realisierung sieht vor, die zentralen Anforderungselemente (PE, nPE, P, F, S) als Objekte im Sinne der objektorientierten Programmierung zu implementieren. Die verbleibenden Anforderungselemente sind entweder Attribute oder Methoden dieser Objekte. Besondere Attribute sind die Träger für Vernetzungsinformation zu den Ableitungen, Cross Links und Variantenverknüpfungen. Die Elementfunktionen sind die Methoden der Objekte. Die Klassen zu den Objekten sind gleichzeitig die Bezeichner der Anforderungselemente. Sie werden außerhalb der Produktorganismen in einem Begriffssystem in sogenannten Begriffskatalogen vorgehalten.

Das Anforderungsmodell unterstützt beide Äste des V-Modells, das heißt sowohl die Produktdefinition mit der Differenzierung der Produkthanforderungen als auch die Integration mit dem Test und der Validierung der entwickelten Produktbestandteile. Die Richtung der technischen Lösung wird schon bei der Zuordnung einer Anforderung durch die Angabe des Produktelements (zum Beispiel: Fensterheber) vorgegeben. Die technische Lösung wird im Laufe der Produktentwicklung durch Eigenschafts- und Merkmalerweiterungen oder Zustandsänderungen konkretisiert.

Die nächsten Schritte zur Umsetzung des Modells sind:

### **Prototyp**

Die Entwicklung eines IT-Prototyps eines Produktorganismuses. Dazu gehören:

- die Erfassung der domänenspezifischen Begriffe zu den Anforderungselementen PE, P/F und nPE für die Kataloge
- die Ermittlung der notwendigen Elementfunktionen mit dem Ziel der Entwicklung einer formalen Sprache zur Erstellung von Elementfunktionen
- die Entwicklung eines Interpreters (eventuell auch Compiler) für die Übersetzung und Ausführung der Elementfunktionen. Die Interpretation von Randbedingungen soll mit eingeschlossen sein

### **Benutzerschnittstelle**

Zur Erstellung und Änderung der Produkt-DNA sowie den Elementfunktionen durch den Menschen ist eine Benutzerschnittstelle notwendig. Neben der Fähigkeit zur Manipulation des Produktorganismus gehört die Fähigkeit zur Visualisierung umfangreicher vernetzter Strukturen (Produkt-DNA).

### **Systemschnittstelle**

Die Produktorganismen sollen einen Teil der bestehenden IT-Landschaft mit benutzen. Die sind im Besonderen Systeme zur Erzeugung und Verarbeitung von Daten. Dazu gehören im Automobilbau Projektplanungs- und CAD-Systeme sowie die verschiedensten Simulationswerkzeuge.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept und Anforderungsmodell ist der erste Schritt auf dem neuen Weg des Anforderungsmanagements. Bleibt zu hoffen, dass die Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet weiter verfolgt wird.



## 8 Literaturverzeichnis

- [Ahre-00] Ahrens, Gritt: Das Erfassen und Handhaben von Produktanforderungen: Methodische Voraussetzungen und Anwendungen in der Praxis, TU Berlin, Fachbereich Maschinenbau und Produktionstechnik, 2000
- [Akao-92] Akao, Yoji: QFD-Quality Function Deployment, Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1992
- [AlKl-06] Alfert, Klaus; Joos, Stefan: Konfigurationsmechanismen für variante Anforderungsmodelle - RE meets CM, HOOD, REConf 2006 - 5. Requirements Engineering Tagung, München
- [Balz-01] Balzert, Heide: UML kompakt, Spektrum Verlag, 2001, ISBN 3-8274-1054-1
- [BeKü-95] Beitz, W.; Küttner, K.-H.; et al: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer, 1995, ISBN 3-540-57650-9
- [Bosc-03] KFZ-Fachwissen kompakt: Robert Bosch GmbH, Vieweg Verlag, 2003, ISBN 3-528-23876-3
- [BRJ-99] Booch, Grady; Rumbaugh, James; Jacobson, Ivar: Unified Modelling Language User Guide, Prentice Hall, 1999, ISBN 0-201-57168-4
- [Broc-01] Brockhaus multimedial 2001: Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Dudenverlag, 2001
- [CaRe-03] Campbell, Neil A.; Reece, Jane B.: Biologie, Spektrum, Akademischer Verlag, 2003, ISBN 3-8274-1352-4

- [CLZ-96] Czihak; Langer; Ziegler: Biologie: 6. Auflage, Springer, Berlin, 1996, ISBN 3-540-615577-1
- [DIN 2331] Begriffssysteme und ihre Darstellung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 1980
- [DIN 2342 Teil 1] Begriffe der Terminologielehre, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 1991
- [DIN 4000-1] Sachmerkmalsleisten, Begriffe und Grundsätze, September 1992
- [DIN 820-2] Normungsarbeit - Teil 2: Gestaltung von Dokumenten, Teil 3 Regeln für den Aufbau und die Abfassung von CEN/CENELEC-Publikationen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 2004
- [Eber-05] Ebert, Christoph: Systematisches Requirements Management - Anforderungen ermitteln, spezifizieren, analysieren und verfolgen, dpunkt Verlag, 2005, ISBN 3-89864-336-0
- [Ehrl-95] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion, Hanser, München, 1995, ISBN 3-446-15706-9
- [EiSt-01] Eigner, Martin; Stelzer, Ralph: Produktdatenmanagement-Systeme: Ein Leitfaden für Product Development und Life-Cycle-Management, Springer, 2001, ISBN 3-540-66870-5
- [Fisc-02] Fischer, Ernst Peter: Das Genom, Fischer Verlag, 2002, ISBN 3-596-15362-x
- [Fisc-03] Fischer, Ernst Peter: Geschichte des Gens, Fischer Verlag, 2003, ISBN 3-596-15363-8
- [Geba-01] Gebauer, M.: Kooperative Produktentwicklung auf Basis verteilter Anforderungen, Uni KA, RPK, Shaker Verlag, 2001, ISBN 3-8265-9200-X

- 
- [GGK-99] Grabowski, H.; Gebauer, M.; Klaar, O.: Interactive Product Development by using Requirement Modeling System, Universität Karlsruhe, RPK, 1999
- [Grue-06] Grütter, Rolf: Software Agenten im Sematic Web, Informatik Spektrum, Band 29 Heft 1, Springer Verlag, 2006
- [Hood-07] 6. Requirements Engineering Tagung – Von der Theorie zur Praxis, HOOD in Kooperation mit GfSE5.-8. März 2007, München, 2007
- [Ilie-06] Ilieva, Ivalina: Wissensmanagement: Strukturierung von Konstruktionsrichtlinien, Robert Bosch GmbH, Bühlertal TU-Sofia, Fakultät für deutsche Ingenieur- und Betriebswirtschaftsausbildung, 2006
- [Inco-07] Requirements Management Tools Survey, <http://www.paper-review.com/tools/rms/read.php>, 2007
- [Joer-05] Jörg, Matthias A.J.: Ein Beitrag zur ganzheitlichen Erfassung und Integration von Produkthanforderungen mit Hilfe linguistischer Methoden: Forschungsberichte aus dem Institut für Rechneranwendung in Planung und Konstruktion der Universität Karlsruhe, Band 3/2005, Shaker Verlag, 2005, ISBN 3-8322-4032-2
- [Jörg-03] Jörg, Matthias: Die semantische Auswertung von Produkthanforderungen mit Hilfe von GermaNet, Daimler Chrysler AG, Ulm, 2003
- [Jorg-04] Jorgensen, Kaj A.: Modelling Multiple Abstraction Levels: 7th Workshop on Product Structuring - Product Platform Development, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2004
- [JoSh-91] Johnson, B; Shneiderman, B.: A space-filling approach to the visualization of hierarchical information structures, Proceedings of 2nd International IEEE Visualization Conference, 1991

- [KDDS-96] Klöppel, B.; Dapper, T.; Dietrich, C.; Seeber, R.:  
Objektorientierte Modellierung und Programmierung mit  
C++, Band 1, Oldenburg Verlag, 1996, ISBN 3-486-23905-8
- [Krus-00] Krusche, Thomas: Strukturierung von Anforderungen für eine  
effiziente und effektive Produktentwicklung, Verlag Mainz,  
2000, ISBN 3-89653-796-2
- [KTA-01] Krause, Frank-Lothar; Tang, Tarc; Ahle, Ulrich (Hrsg.):  
Leitprojekt, Integrierte Virtuelle Produktentwicklung (iVIP),  
Fortschrittsbericht - April 2001, Bundesministerium für  
Bildung und Forschung (bmb+f), Carl Hanser Verlag, 2001,  
ISBN 3-8167-5638-7
- [KTA-02] Krause, Frank-Lothar; Tang, Tarc; Ahle, Ulrich (Hrsg.):  
Leitprojekt, Integrierte Virtuelle Produktentwicklung (iVIP),  
Fortschrittsbericht, März 2002: Bundesministerium für  
Bildung und Forschung (bmb+f), 2002
- [LRP-95] Lamping, J; Rao, R; Pirolli, P: A focus+context technique  
based on hyperbolic geometry for visualizing large  
hierarchies, Proceedings of the Conference on Human Factors  
in Computing Systems, pp. 401-408, 1995
- [MaBa-05] Mayer-Bachmann, Roland: Natural Perspective for  
Requirements Management and Integrated Product  
Development - ProSTEP iViP Science Days 2005, ProSTEP  
iViP Association, Darmstadt, 2005
- [MaOv-03] Mayer-Bachmann, Roland; Ovtcharova, Jivka: Living  
Products - Biologische Erkenntnisse für die industrielle  
Wertschöpfung, Dressler, CAD-CAM Report Nr. 12, 2003
- [Muel-06] Müller, Matthias: Concept of a Graphical User Interface for a  
Requirements Management System in the Automotive Sector,  
Universität Karlsruhe (TH) Institut für  
Informationsmanagement im Ingenieurwesen, 2006

- 
- [Nach-98] Nachtigall, Werner: Bionik - Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Springer Verlag, 1998, ISBN 3-540-63403-7
- [Oest-04] Oesterreich, Bernd: Objektorientierte Softwareentwicklung: Analyse und Design mit der UML 2.0, Oldenburg Verlag, 2004, ISBN 3-486-27266-7
- [Ovtc-97] Ovtcharova, Jivka: A Framework for Feature Based Product Design, Reihe 20 - Rechnergestützte Verfahren, Nr. 241, VDI Verlag, ISBN 3-18-324120-X
- [Rapp-99] Rapp, Thomas: Produktstrukturierung, Gabler Verlag, 1999, ISBN 3-8244-7010-1
- [Reck-07] Recknagel, Matthias: Anforderungsmanagement ohne Grenzen mit RIF, HOOD, REConf 2007 – 6. Requirements Engineering Tagung, München, 2007
- [Saue-92] Sauer, Herrmann: Relationale Datenbanken: Theorie und Praxis, Addison-Wesley, 1992, ISBN 3-89319-573-4
- [ScRe-07] Schmidt, Jörg; Reisch, Bernhard: Produktionsgerecht entwickeln - Produktionsanforderungen an die Elektronik-Entwicklung managen, REConf 2007 – 6. Requirements Engineering Tagung, München,
- [Shne-92] Shneiderman, B.: Tree visualization with tree-maps: 2-d space-filling approach, ACM Transactions on Graphics 11(1), pp 92-99, 1992
- [Smet-06] Smethurst, Graham: Anforderungsmanagement bei BMW - Die Herausforderungen der Zukunft in den Griff bekommen, REConf 2006 - 5. Requirements Engineering Tagung, München, 2006
- [Tele] Telelogic DOORS® / ERS: Get it right the first time - Writing better requirements, Telelogic, Malmö, Sweden, [www.telelogic.com](http://www.telelogic.com),

- [UMA-03] Ullrich, Mike; Maier, Andreas; Angele Jürgen: Taxonomie, Thesaurus, Topic Map, Ontologie - ein Vergleich, Ontoprise GmbH, Karlsruhe, 2003
- [Webe-02] Weber, Thomas P.: Schnellkurs Genforschung, Dumont, 2002, ISBN 3-8321-5957-6
- [WeDe-02] Weber, C; Deubel, T.: Von CAx zu PLM - Überlegungen zur Software-Architektur der Zukunft: VDI, Tagung zur CAT Engineering 2002, 18.-19. Juni 2002, Stuttgart, VDI, 2002
- [WWD-05] Weber, Christian; Werner, Horst; Deubel, Till: A new methodical concept to develop products: Property Driven Development/Design (PDD), Saarland University, Engineering Design/CAD, 2005
- [Zieg-07] Ziegler, Cai: Von Bäumen und Karten – Darstellung hierarchischer Strukturen mit Treemaps, Heise, iX, 5 / 2007
- [Zwic-98] Zwicker, Ekkehard: Unterstützung der unternehmensübergreifenden Produktentwicklung durch Einsatz moderner Informationstechnologien, 1998

## **9 Anhang**

## 9.1 Symbolik der Anforderungselemente

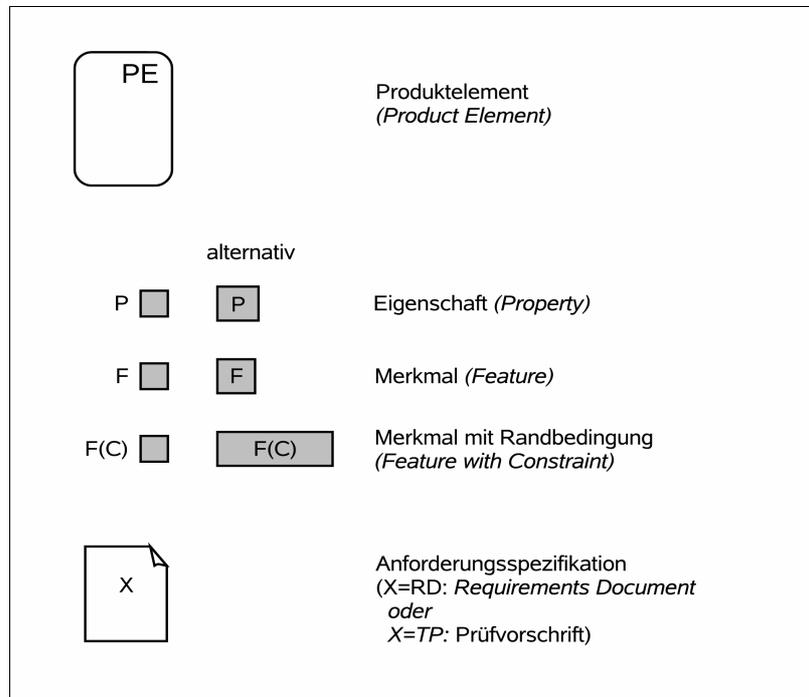


Abbildung 48: Symbole der Anforderungselemente (1)

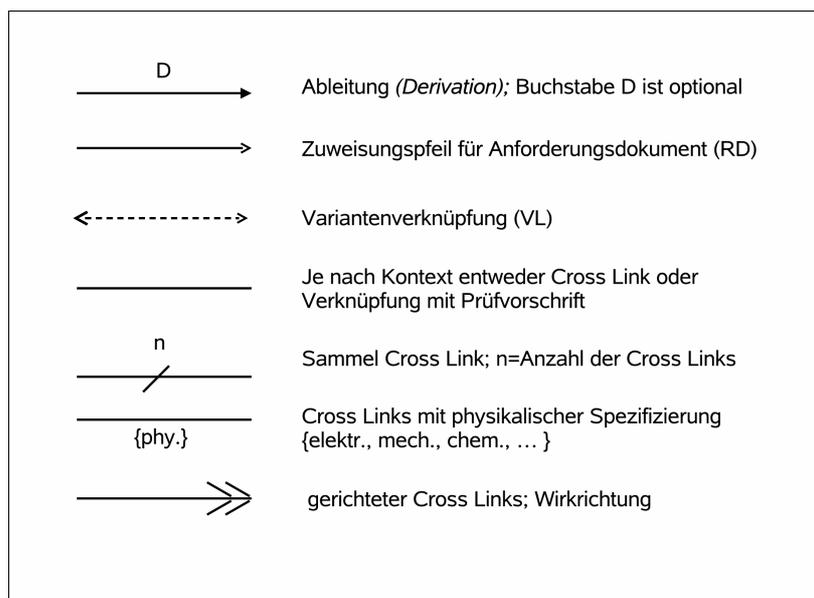


Abbildung 49: Symbole der Anforderungselemente (2)

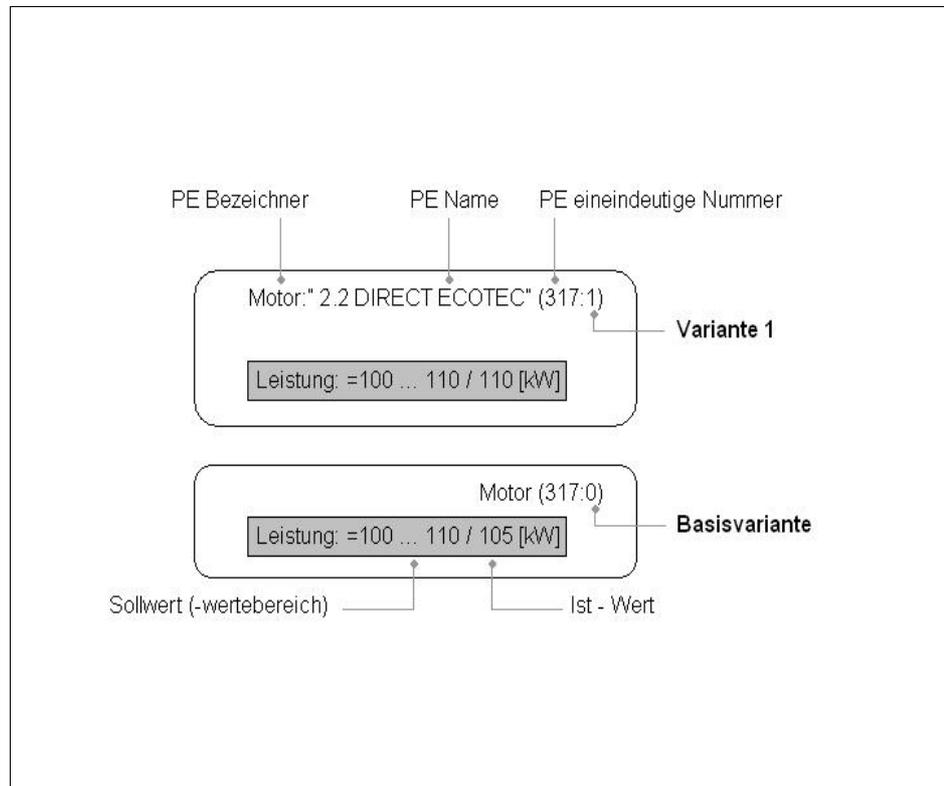


Abbildung 50: Darstellung und Kennzeichnung von Varianten  
(Vorschlag, Beispiel: Motor)

## 9.2 Verbformen und gleichbedeutende Ausdrücke

Auszug aus DIN 820-2, Seite 99

<b>Verbform</b>	<b>Gleichbedeutende Ausdrücke für die Anwendung in Ausnahmefällen</b>
muss (shall)	ist zu ist erforderlich es ist erforderlich, dass hat zu lediglich ... zulässig es ist notwendig
darf nicht (shall not)	es ist nicht zulässig [erlaubt] [gestattet] es ist unzulässig es ist nicht zu es hat nicht zu

*Tabelle 10: Tabelle G.1 - Anforderungen*

<b>Verbform</b>	<b>Gleichbedeutende Ausdrücke für die Anwendung in Ausnahmefällen</b>
sollte (should)	es wird empfohlen, dass ... ist in der Regel ...
sollte nicht (should not)	wird nicht empfohlen sollte vermieden werden

*Tabelle 11: Tabelle G.2 - Empfehlung*

<b>Verbform</b>	<b>Gleichbedeutende Ausdrücke für die Anwendung in Ausnahmefällen</b>
darf (may)	ist zugelassen ist zulässig ... auch ...
braucht nicht (need not)	ist nicht erforderlich keine ... nötig

*Tabelle 12: Tabelle G.3 - Zulässigkeit*

<b>Verbform</b>	<b>Gleichbedeutende Ausdrücke für die Anwendung in Ausnahmefällen</b>
kann (can)	vermag es ist möglich, dass lässt sich ...; in der Lage (sein) zu ...
sollte nicht (cannot)	vermag nicht es ist möglich, dass ... ... lässt sich nicht ....

*Tabelle 13: Tabelle G.4 – Möglichkeit und Vermögen*

Achtung: „sollte nicht“ ist in DIN 820-2 mehrdeutig, da es sowohl in Tabelle G.2 als auch in Tabelle G.4 vorkommt.

### 9.3 Mutation – biologische Definition

[Auszug aus Enzyklopädie: Mutation. DB Sonderband: Wikipedia 2005/2006, Seite 561201 f.]

Eine *Mutation* (lat. *mutare* verändern) ist eine Veränderung des Erbgutes eines Organismus durch Veränderung der Abfolge der Nukleotidbausteine oder durch Veränderung der Chromosomenzahl, die nicht auf Rekombination oder Segregation beruht. Dieser Begriff wird daher nur für einen Teilbereich aller möglichen Chromosomenaberrationen verwendet. Durch eine Mutation wird die in der DNA gespeicherte Information verändert, und dadurch können einzelne Merkmale (der Phänotyp) verändert werden.

#### 1. Arten der Mutation

##### 1.1. Unterscheidung nach Erbllichkeit

##### 1.2. Unterscheidung nach Ursache

##### 1.3. Unterscheidung nach erfolgter Veränderung

##### 1.4. Unterscheidung nach Folgen für den Organismus

#### 2. Folgen

##### 2.1. keine Folgen - bei stillen, neutralen Mutationen

##### 2.2. negative Folgen

##### 2.3. positive Folgen

#### 1. Arten der Mutation

##### 1.1. Unterscheidung nach Erbllichkeit

- **Keimbahnmutationen:** sind Mutationen, die an die Nachkommen über die Keimbahn weitergegeben werden. Sie betreffen Eizellen oder Spermien und werden durch Zellteilung an alle anderen Zellen weitergegeben. Diese Mutationen sind im Rahmen der Evolutionstheorie sehr wichtig, da sie von einer Generation zur nächsten übertragbar sind.

- Somatische Mutationen: sind Mutationen, die alle anderen Körperzellen aber nicht die Keimzellen betreffen können. Sie haben daher auch nur Auswirkungen auf die Zellen des Organismus, in dem sie stattfinden, das heißt, somatische Mutationen werden nicht vererbt. Wenn diese somatischen Mutationen nur vereinzelt auftreten, haben sie keine oder nur geringe Folgen. Wird ihr Auftreten jedoch durch Mutagene wie zum Beispiel energiereiche Strahlung oder Umweltgifte verstärkt, haben sie ein großes Gefahrenpotential. So können sich dadurch unter anderem normale Körperzellen in ungebremst wuchernde Krebszellen umwandeln. Auch bei dem Alterungsprozess eines jeden Organismus spielen somatische Mutationen eine entscheidende Rolle. Sie haben daher in der praktischen Medizin eine zunehmende Bedeutung.

#### 1.2. Unterscheidung nach Ursache

- Spontanmutationen: sind Mutationen ohne erkennbare Ursache.
- Induzierte Mutationen: sind durch Mutagene (mutationsauslösende Stoffe oder Strahlungen) erzeugte Mutationen.

#### 1.3. Unterscheidung nach erfolgter Veränderung

- Genmutation: ist eine erbliche Änderung, die nur das einzelne Gen betrifft. durch Substitution, Deletion oder Insertion von Nukleotiden.
- Chromosomenmutation: ist ebenfalls eine erbliche Änderung, die einzelne Chromosomen in ihrer Struktur betrifft.
- Genommutation oder numerische Chromosomenaberration: ist eine nicht erbliche Änderung, bei der ganze Chromosomen oder gar Chromosomensätze vermehrt werden oder ganze Chromosomen verloren gehen.

Mit der Entdeckung des alternativen Splicings kommt ein weiterer Mutationstyp hinzu: die veränderte Regulation des Splicings, die letztlich auch im Erbgut, aber meist an anderer Stelle, verankert ist.

#### 1.4. Unterscheidung nach Folgen für den Organismus

- Letale Mutationen: sind Mutationen, die nach ihrem Auftreten einen Organismus unabhängig von seiner jeweiligen Lebensphase in jedem Falle töten.
- Konditional-letale Mutationen: sind Mutationen, deren Veränderung des Genproduktes einen Organismus nur bei bestimmten Wachstumsbedingungen tötet.
- Loss-of-function-Mutationen: Hierbei wird ein Gen durch eine Mutation funktionslos. Ist der Funktionsverlust vollständig, spricht man auch von Nullallel oder einem amorphen Allel. Bleibt ein Teil der Wildtypfunktion erhalten, dann bezeichnet man es auch als hypomorphes Allel. Loss-of-function-Mutationen sind immer rezessiv, da ein anderes Allel den Funktionsverlust eines Gens auffangen kann.
- Gain-of-function-Mutationen: Hierbei gewinnt ein Gen an Aktivität und wird dann auch als hypermorph bezeichnet. Entsteht durch die Mutation ein komplett neuer Phänotyp, dann bezeichnet man das Allel auch als neomorph. Eine gain-of -function-Mutation erzeugt immer einen dominanten Phänotyp.
- Stille, neutrale Mutationen: sind Mutationen, die keinerlei Folgen für den Organismus haben.

## 2. Folgen

### 2.1. Keine Folgen - bei stillen, neutralen Mutationen

Die meisten Mutationen führen dazu, dass eine Veränderung in einem DNA-Abschnitt keine Konsequenzen nach sich zieht, wenn die Stelle, die verändert wurde, nicht für eine genetisch relevante Information benutzt wird. Aber auch wenn die veränderte Stelle benutzt wird, kann es sein, dass der Informationsgehalt des Gens sich nicht verändert hat, da eine Reihe von Aminosäuren identisch kodiert sind (*siehe*: genetischer Code). Daher werden diese Mutationen *stille Mutationen* oder *neutrale Mutationen* genannt.

Solche Arten von Mutationen führen dazu, dass innerhalb einer Gruppe von Organismen funktional gleiche Gene unterschiedliche genetische „Buchstaben“ innerhalb ihrer Nukleotid-Sequenz besitzen. Diese Unterschiede, die Polymorphismen heißen, lassen sich ausnutzen, um Verwandtschaftsbeziehungen zwischen Individuen abzuleiten oder auch, um eine durchschnittliche Mutationsrate abzuschätzen.

Zusätzlich kommt noch zum Tragen, dass nicht nur beim diploiden Chromosomensatz oft mehrere Gene die gleichen genetischen Eigenschaften codieren, sodass sich eine Mutation aus diesem Grunde nicht sofort nachteilhaft bemerkbar machen muss.

## 2.2. Negative Folgen

Besonders größere Veränderungen im Erbgut führen oft zu nachteilhaften Veränderungen im Stoffwechsel oder auch zu Fehlbildungen und anderen Besonderheiten.

Es gibt verschieden Erbkrankheiten, die entweder vererbt sind oder durch Mutation neu auftreten können. Beispiele dafür sind:

- die Sichelzellenanämie, eine Blutkrankheit, bei der sich die äußere Form der roten Blutkörperchen ändert, was u. a. verringerte Sauerstoffaufnahme zur Folge hat,
- die Phenylketonurie, wobei der Abbau der Aminosäure Phenylalanin gestört ist, wodurch Schädigungen des kindlichen Gehirns hervorgerufen werden können,
- der Albinismus und
- die Mukoviszidose oder zystische Fibrose, die häufigste genetisch bedingte Krankheit Nordeuropas. Bei ihr ist das CFTR-Gen, das die Konsistenz der Drüsensekrete steuert, defekt. Wenn das Sekret zu zäh ist, kann es (je nach Drüse) die Atemwege oder die Ausführungsgänge der Drüsen verstopfen.
- Außerdem Formen von Minderwuchs, bei denen die Arme und Beine ungewöhnlich kurz sind, während der Körper sonst wie üblich gebaut ist,
- die Rot-Grün-Blindheit und
- die Bluterkrankheit, bei der die Blutgerinnung praktisch nicht einsetzt.

## 2.3. positive Folgen

Der Entwicklungslehre Darwins zufolge ist die Mutation mit für die Artenvielfalt auf der Erde verantwortlich. Mutationen sind so (aber nicht nur) ein natürliches Phänomen und ermöglichen erst die Entwicklung der Arten (*siehe*: Evolutionslehre). Obwohl die Mutation die Dynamik der Evolution ausmacht, ist nur in den selteneren Fällen mit einer Veränderung im Genom ein Vorteil für das Individuum zu erwarten.

Durch Austausch der Basenpaare werden Proteine verändert oder einfach nur anders reguliert, was eine Änderung im Körperbau, oder in Körperfunktionen und oder im Verhalten des Organismus bewirken kann, die ihm Vorteile gegenüber seinen unveränderten Artgenossen bietet. Wenn diese Mutation an die Nachkommen vererbt wird, hat sie eine erste Voraussetzung erfüllt, dass sie sich einst „durchsetzen“ kann.

Der Mensch macht sich zudem den genomverändernden Effekt ionisierende Strahlen zunutze, um Mutationen künstlich auszulösen. Eine Anwendung besteht in der Bestrahlung von Blumen- und Pflanzensamen, um bisher unbekannte Formen zu erzeugen und wirtschaftlich zu nutzen. Das Verfahren hat meist auf Grund der breitgestreuten, zu umfangreichen und ungezielten Veränderung des Erbmaterials eine sehr geringe Erfolgsquote.

## Die drei Steinmetze (zweiter Teil)

Unser Märchenerzähler besuchte später einmal das Werk eines führenden deutschen Automobilbauers. Er sah die mit glänzenden Augen wartenden Selbstabholer. Sie standen hinter der Scheibe und beobachteten einen älteren Mann, der ihrem Auto mit einem Putztuch den letzten Glanz verlieh. Unser Märchenerzähler fragte ihn: „Was machen Sie da eigentlich?“ „Ich Sorge dafür, dass diese Kunden das beste Auto der Welt bekommen.“ Sein Stolz zeigte sich in seinem aufrechten Rückrad und den strahlenden Augen.

Und wenn er nicht gestorben ist, dann ist er heute noch stolz auf sein Werk.

ISSN: 1860-5990

ISBN: 978-3-86644-194-1

---

[www.uvka.de](http://www.uvka.de)