

---

**Beitrag zum Variantenmanagement und zur Prozessoptimierung  
im Wagenkastenbau von Schienenfahrzeugen**

---

Von Diplom-Ingenieur  
Holger Schmidt  
aus Berlin

von der Fakultät V, Verkehrs- und Maschinensysteme,  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -  
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. V. Schindler

Gutachter: Prof. Dr. G. Seliger

Gutachter: Prof. Dr. M. Hecht

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 30. Januar 2002

Berlin 2002

D 83

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
0 Verwendete Kurzzeichen .....	IV
1 Einleitung .....	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit.....	4
2 Ausgangsbedingungen und Analyse der Problemstellung .....	6
2.1 Marktbedingungen .....	6
2.2 Variantenvielfalt als Problemstellung .....	7
2.2.1 Klassifizierung der vielfaltbedingenden Gründe .....	11
2.2.1.1 Infrastruktur .....	12
2.2.1.2 Betrieb .....	14
2.2.1.3 Weitere Gründe .....	15
2.3 Folgen der Variantenvielfalt.....	17
2.3.1 Hersteller.....	17
2.3.2 Betreiber.....	19
3 Stand der Technik .....	21
3.1 Aufbau von Wagenkästen bei Schienenfahrzeugen.....	21
3.1.1 Differentialbauweise .....	24
3.1.2 Integralbauweise .....	26
3.1.3 Sonderbauweisen (Wickel- und Schalenbauweise).....	30
3.1.4 Modulare Bauweisen .....	34
3.2 Entwicklungsablauf bei Schienenfahrzeugen .....	38
3.3 Fertigung von Schienenfahrzeugen .....	40
3.4 Ableiten der Defizite .....	44
3.4.1 Produktstruktur .....	44
3.4.2 Fertigungsprozesse.....	47

---

4	Entwicklungsszenarien und Ableiten des Handlungsbedarfs .....	50
4.1	Entwicklungsszenarien und Erwartungen.....	50
4.2	Vielfalterhöhende Entwicklungen: <i>Szenario Spezifikationsdominanz</i> .....	52
4.2.1	Einsatzfelder und Antriebskonzepte .....	52
4.2.2	Vielfalt und Wettbewerb von Verkehrsunternehmen .....	52
4.2.3	Einsatzspezifikation und betriebliche Randbedingungen .....	53
4.2.4	Local-content-Forderungen .....	53
4.3	Vielfaltreduzierende Entwicklungen: <i>Szenario Kostendominanz</i> .....	53
4.3.1	Wirtschaftliche Entwicklung der Verkehrsunternehmen .....	54
4.3.2	Kosten der Fahrzeuge.....	54
4.3.3	Verkürzung der Lieferzeiten .....	56
4.3.4	Interoperabilität und politische Entwicklungen.....	56
4.4	Resultierende Anforderungen aus den Szenarien.....	57
5	Entwicklung des Lösungsansatzes .....	59
5.1	Modularisierung und Standardisierung.....	59
5.1.1	Module und Modularisierung .....	59
5.1.1.1	Definition und Ziele .....	59
5.1.1.2	Typen und Arten der Modularität .....	62
5.1.2	Standardisierungsebenen .....	66
5.1.2.1	Standardfahrzeug .....	67
5.1.2.2	Standardisierung von Wagenkastensegmenten .....	69
5.1.2.3	Standardisierung von Komponenten .....	70
5.1.2.4	Standardisierung von Lösungs- und Funktionsprinzipien .....	71
5.1.3	Bewertung der Einsparpotenziale.....	73
5.2	Analogiebetrachtung modularer Bauweisen.....	75
5.2.1	Modularisierung im Busbau.....	75
5.3	Umsetzung von Modulbauweisen für das Variantenmanagement von Wagenkästen .....	79
5.3.1	Erarbeitung modularer Konzepte des Wagenkastens .....	80
5.3.2	Eigenschaften und Defizite von Modul- und Plattformkonzepten .....	84

---

5.3.3	Bewertung der Konzepte und Ableitung eines Lösungskonzeptes.....	92
5.4	Kundenindividuelle Serienfertigung.....	95
5.4.1	Process Customization.....	95
5.4.2	Zuordnung von Marktanforderungen in Wettbewerbsstrategien.....	97
5.4.3	Die Wagenkastenstruktur als Mischsystem.....	98
5.4.3.1	Produktstruktur und Prozesszuordnung.....	98
5.4.3.2	Konfigurations- und Berechnungswerkzeuge.....	100
5.4.4	Vorgehensweise zur Generierung des Mischsystems.....	103
5.4.4.1	Submodulbildung.....	104
5.4.4.2	Analyse der Auswirkungen von Variationsanforderungen.....	106
5.4.4.3	Bauweisen- und Prozesszuordnung.....	107
5.4.4.4	Ableitung von Basis- und Variationsmodulen.....	109
6	Anwendungsbeispiel und Realisierungsansatz.....	111
6.1	Anwendungsbeispiel zur Mischsystembildung des Wagenkastens.....	111
6.1.1	Submodulbildung und Topologieanalyse.....	111
6.1.2	Analyse der Auswirkungen von Variationsanforderungen.....	113
6.1.3	Zuordnung von Bauweisen und Fertigungsverfahren.....	116
6.1.4	Vergleich der Matrizen und Ableitung der Basis- und Variationsmodule.....	120
6.2	Realisierungsansatz „Modulare Hybridbauweise“.....	126
6.2.1	Konzept und Ziele.....	126
6.2.2	Aufbau und Fertigung.....	127
6.2.3	Ergebnisse.....	133
6.2.3.1	Zeiten.....	133
6.2.3.2	Kosten.....	136
6.2.3.3	Ausblick.....	137
7	Zusammenfassung.....	143
8	Literaturverzeichnis.....	146

## 0      **Verwendete Kurzzeichen**

### **Abkürzungen**

AG	Aktiengesellschaft
ASB	Abroll-Streck-Biegen
BOStrab	Betriebsordnung Straßenbahnen
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CI	Corporate Identity
CIM	Computer Integrated Manufacturing
DB	Deutsche Bahn
d.h.	das heisst
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
EU	Europäische Union
Fa.	Firma
FEM	Finite Elemente Methode
FVK	Faserverbundkunststoff
FE	Finite Elemente
F <sub>I</sub>	Funktion Innenausbau
F <sub>R</sub>	Funktion Rohbau
Hrsg.	Herausgeber
IT	Informationstechnik
K <sub>I</sub>	Komponente Innenausbau
K <sub>R</sub>	Komponente Rohbau
KTH	Königliche Technische Hochschule
LCC	Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
LKW	Lastkraftwagen

---

M	Modul
MC	Mass Customization (kundenindividuelle Massenfertigung)
NE	Nichtbundeseigen
PC	Process Customization (kundenindividuelle Serienfertigung)
PKW	Personenkraftwagen
PPS	Produktionsplanung und –steuerung
PRWB	Press-Roll-Walz-Biegen
RASB	Räumliches Abroll-Streck-Biegen
s. S.	siehe Seite
sog.	sogenannte
TU	Technische Universität
UIC	Union de chemins de fer
ULIB	Ultralight Integral Body
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
VW	Volkswagen AG
z.B.	zum Beispiel

**Formelzeichen**

$V$	Variantenvielfalt
$k$	Anzahl der Variationsmodule
$n$	Anzahl der Varianten pro Variationsmodul

## 1 Einleitung

### 1.1 Einführung

Der Erfüllung der Bedürfnisse nach Mobilität kommt auf Grund der zunehmenden Dezentralisierung und Globalisierung von Unternehmen sowie dem Wunsch der Bevölkerung immer schneller immer weiter entfernte Ziele zu erreichen, eine wachsende Bedeutung zu. Der Schienenfahrzeugverkehr übernimmt dabei vor allem als Personentransportmittel eine bedeutende Rolle [VER01].

Obwohl der Schienenverkehr durch seine systembedingten Eigenschaften, wie Transportgeschwindigkeit, -sicherheit, und –kapazität, Ressourcenschonung, Flächenbedarf und Unfallhäufigkeit, klare Vorteile gegenüber anderen Verkehrsträgern besitzt, findet zunehmend ein harter Wettbewerb zwischen der Bahn, PKW, Bus und Flugzeug statt, wobei der Straßenverkehr immer höhere Anteile übernimmt. Ausgehend vom Jahr 1998 werden jährliche Steigerungsraten im PKW-Verkehr um 30%, im LKW-Verkehr um bis zu 50% vorhergesagt [JOB98]. Dies führt langfristig zu einer Verschiebung der Anteile der einzelnen Verkehrsträger am Gesamtverkehrsaufkommen und damit zu einer Umverteilung des „Modal Split“.

Um diesen ökologisch und verkehrspolitisch bedenklichen Entwicklungen zu begegnen und die Attraktivität des Schienenverkehrs zu erhöhen, wurde mit der Bahnreform Ende 1993, der Umwandlung der staatlichen Bundesbahn zur privatwirtschaftlichen Deutschen Bahn AG (DB AG), ein deutlicher Impuls in Richtung Marktwirtschaft und Kundenorientierung gegeben [LUD98, BAH01]. Diese strategische Neuausrichtung des Bahnverkehrs löste in der gesamten Schienenverkehrsbranche eine Welle von Veränderungen aus, die bis heute anhält Bild 1.

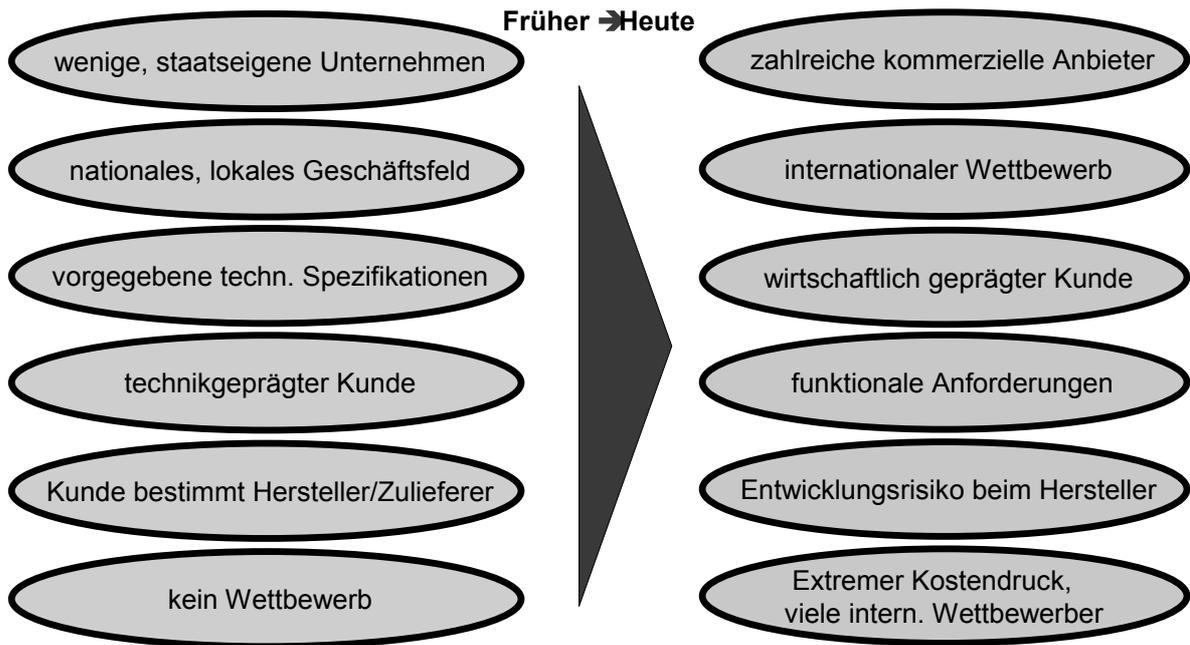
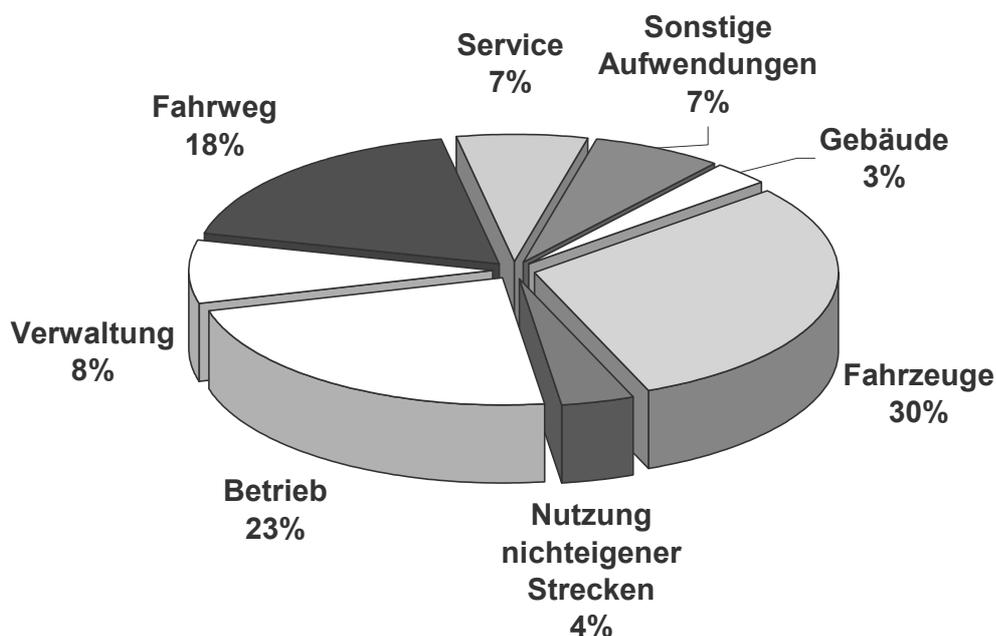


Bild 1 Veränderungen im Schienenfahrzeugmarkt [ECK98]

Die zukünftige Stellung des schienengebundenen Verkehrs wird innerhalb dieses Umgestaltungsprozesses davon abhängen, wie sich seine Kundenorientierung und Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu den konkurrierenden Verkehrsträgern entwickelt.

Eine bedeutende Einflussgröße stellen dabei die eingesetzten Fahrzeuge dar, die mit hoher Einsatzspezifikation zu wirtschaftlichen Bedingungen innerhalb kurzer Entwicklungszeiträume verfügbar sein müssen. Die Fahrzeuge bilden für den Betreiber eine wesentliche Schnittstelle zu seinen Kunden, führen jedoch auch durch Anschaffung, Betrieb und Instandhaltung zu hohen Kosten (Bild 2).



**Bild 2** Kostenstruktur eines Stadtbahnbetreibers [MEY99]

Die Hersteller von Schienenfahrzeugen werden durch die vom Markt geforderte ausgeprägte Einsatzspezifikation der Fahrzeuge mit einer branchentypischen, schwer zu lösenden Aufgabe konfrontiert:

Zum einen müssen die Fahrzeuge an die jeweiligen Transportaufgaben, die spezifischen Betriebsabläufe und Randbedingungen sowie Kundenwünsche in Form von entsprechenden Fahrzeugvarianten, die zumeist die komplette Fahrzeugstruktur betreffen, hinreichend gut angepasst sein. Zum anderen sind im Interesse der Wirtschaftlichkeit und der geforderten kurzen time-to-market-Zyklen umfangreiche Anpassungen bzw. auftragspezifische Neuentwicklungen kaum umzusetzen.

Die vergleichsweise kleinen Stückzahlen im Schienenfahrzeugmarkt führen aufgrund der hohen einsatzspezifischen Variantenbildung zu sehr kleinen Losgrößen und zu einer unbefriedigenden wirtschaftlichen Situation der Hersteller, deren Markt sich aufgrund der aufgeführten Wettbewerbsbedingungen zunehmend verdichtet.

Ein Ansatz zum Lösen dieses Zielkonfliktes wird in einer Standardisierung von Produkten und Prozessen und einem produkt- und prozessorientiertem Variantenmanagement gesehen [ECK00, EHR95, FOR99]. Mit Hilfe einer Standardisierung und der Mehrfachverwendung von bestimmten Fahrzeugbereichen und Strukturelementen sollen Skaleneffekte erzielt werden, die eine wirtschaftliche Konfiguration von Fahr-

zeugvarianten erlauben und den Konstruktions- und Organisationsaufwand begrenzen. Andererseits führt jede Form der Standardisierung zu einer Begrenzung der Flexibilität im Sinne einer kundenspezifischen Umsetzung. Der Grad der Kundenorientierung wird jedoch insbesondere in der Bahnbranche als wesentlicher Wettbewerbsfaktor der deutschen Schienenfahrzeugindustrie gesehen [KÖR00, LIP98]. Aus diesem Grund erscheint eine Strategie der umfassenden Standardisierung nur dann umsetzbar, wenn auf die Bedienung bestimmter Marktsegmente bewusst verzichtet wird, woraus sich die abzusetzende Fahrzeugmenge erneut weiter reduziert. Aufgrund des begrenzten Marktes stellt dies jedoch keine erfolgreiche Wettbewerbsstrategie im Schienenfahrzeugmarkt dar.

Es wird deutlich, dass eine Reduzierung der Variantenvielfalt im Schienenfahrzeugbau keine eindeutige Lösung enthält, sondern sich vielmehr als Optimierungsproblem darstellt. Eine geeignete Lösung dieses Optimierungsproblems erscheint mit derzeitigen konventionellen Bauformen und Produktionskonzepten für nicht erzielbar [ALT78, FRE99, GIE94, KAR00, SEL00].

## **1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit**

Die defizitäre wirtschaftliche Situation der Schienenfahrzeugindustrie zeigt auf, dass das oben beschriebene Optimierungsproblem zur Reduzierung der variantenbedingten Komplexität bisher nicht hinreichend gelöst werden konnte.

Ausgehend von dieser These wird als Ziel dieser Arbeit ein methodisches Vorgehen sowie ein Baukonzept erarbeitet, das eine hohe Variantenbildung im Wagenkastenbau von Schienenfahrzeugen bei gleichzeitiger Reduktion des Anpassungsaufwandes ermöglicht. Es erfolgt hierbei eine Konzentration auf die Wagenkastenstruktur unter Berücksichtigung des hohen Entwicklungs- und Konstruktionsaufwandes, der durch eine kundenspezifische Anpassung der Fahrzeuggeometrie entsteht.

In Kapitel 2 erfolgt eine Darstellung der markttechnischen Ausgangsbedingungen und eine Analyse und Klassifizierung der Gründe sowie eine Betrachtung der Folgen der Variantenbildung im Schienenfahrzeugbau.

Im Anschluss erfolgt eine Darstellung des derzeitigen Technikstandes im Schienenfahrzeugbau, wobei auf die gängigen Bauweisen, Fertigungsprozesse und Organisationsformen eingegangen wird. Die Ableitung der Defizite hinsichtlich einer Bildung von kundenspezifischen Varianten und die Darstellung nicht ausgeschöpfter Potenziale durch die beschriebenen Produktstrukturen und Fertigungsprozesse sind weitere Inhalte des Kapitels.

In einem kurzen Zwischenkapitel werden mögliche Entwicklungsszenarien des Schienenfahrzeugmarktes betrachtet und der Handlungsbedarf für eine kurz- und langfristig erfolgreiche Produkt- und Produktionsstrategie abgeleitet.

In Kapitel 5 wird ein geeigneter Lösungsansatz für ein Variantenmanagement im Schienenfahrzeugbau erarbeitet. Ziel ist hierbei ein geeignetes Konzept, das sowohl hinreichende Standardisierungs- als auch Differenzierungsoptionen bietet. Verschiedene Standardisierungsansätze, sowie modulare und plattformbasierte Produktstrukturen werden dabei hinsichtlich ihrer Potenziale zur Aufwandsreduktion in der Entwicklung und Fertigung und ihrer Einschränkung der Flexibilität hinsichtlich Kundenanforderungen bewertet. In Abgrenzung zu konventionellen, baukastenartigen Konzepten mit anbieterseitig festgelegter Variantenvielfalt wird als Lösungsansatz eine hybride Produkt- und Prozessstruktur erarbeitet, die die Umsetzung einer kundenindividuellen Serienfertigung im Schienenfahrzeugbau ermöglicht. Die Strukturierung des Wagenkastens in fixe und variable Module und die Zuordnung geeigneter Bauformen und Produktionstechnologien erfolgen methodisch unterstützt im Anschluss des Kapitels.

Zum Abschluss erfolgt die exemplarische Anwendung des Ansatzes an einem Beispiel. Die Vorstellung eines umgesetzten Fahrzeugkonzeptes für ein modulares Regionalfahrzeug, das unter Nutzung des vorgestellten Lösungsansatzes erarbeitet wurde sowie der Ausblick auf ein weiterführendes Forschungsprojekt schließen die Arbeit ab.

## 2 Ausgangsbedingungen und Analyse der Problemstellung

### 2.1 Marktbedingungen

Auf dem Markt für Schienenfahrzeuge hat sich seit der Bahnreform ein starker Verdrängungswettbewerb entwickelt. Dieser geht mit einem Preisverfall einher, der bei bestimmten Produkten, etwa bei Lokomotiven, eine Größenordnung von über 40% erreicht hat [FEL97, HEI95]. Die Liberalisierung des Beschaffungsmarktes, Überkapazitäten der Unternehmen um bis zu 30% und die Privatisierung des Betreibermarktes tragen zu einer weiteren Verschärfung der Marktsituation bei [KRU99, WAG99, GIE94, ALT92]. Die im harten Wettbewerb zu alternativen Verkehrsträgern - im Personenverkehr vornehmlich zum PKW, Bus und Flugzeug - stehenden Bahnbetreiber sind auf wirtschaftliche, leistungsfähige und attraktive Fahrzeuge angewiesen, die in kurzer Zeit am Markt verfügbar und spezifisch auf das jeweilige Einsatzprofil angepasst sein müssen. Die geforderten Entwicklungszeiten betragen dabei heute von der Festlegung des Lastenheftes bis zur Auslieferung des zugelassenen Fahrzeugs beispielsweise bei Straßenbahnen nur 18 Monate [FEL97a]. Daraus ergeben sich zunehmend Forderungen nach neuen Entwicklungs-, Produkt- und Produktionsstrukturen, die bei hoher Wirtschaftlichkeit eine Beschleunigung der Produktentstehung bei hoher Anpassung an den jeweiligen Einsatzfall und an die spezifischen Kundenwünsche ermöglichen. Bild 3 verdeutlicht grafisch diese Anforderungen.

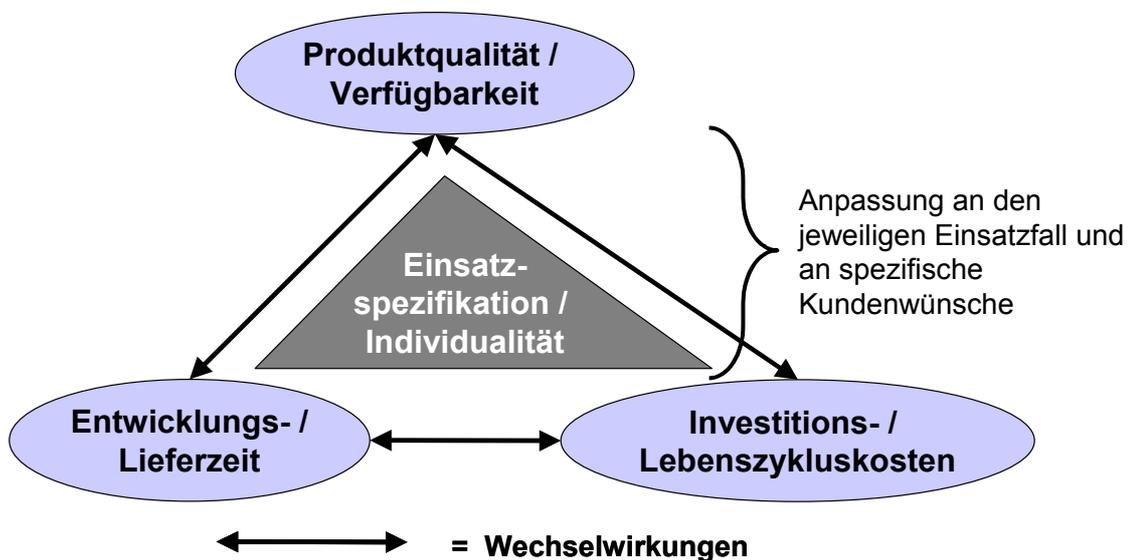
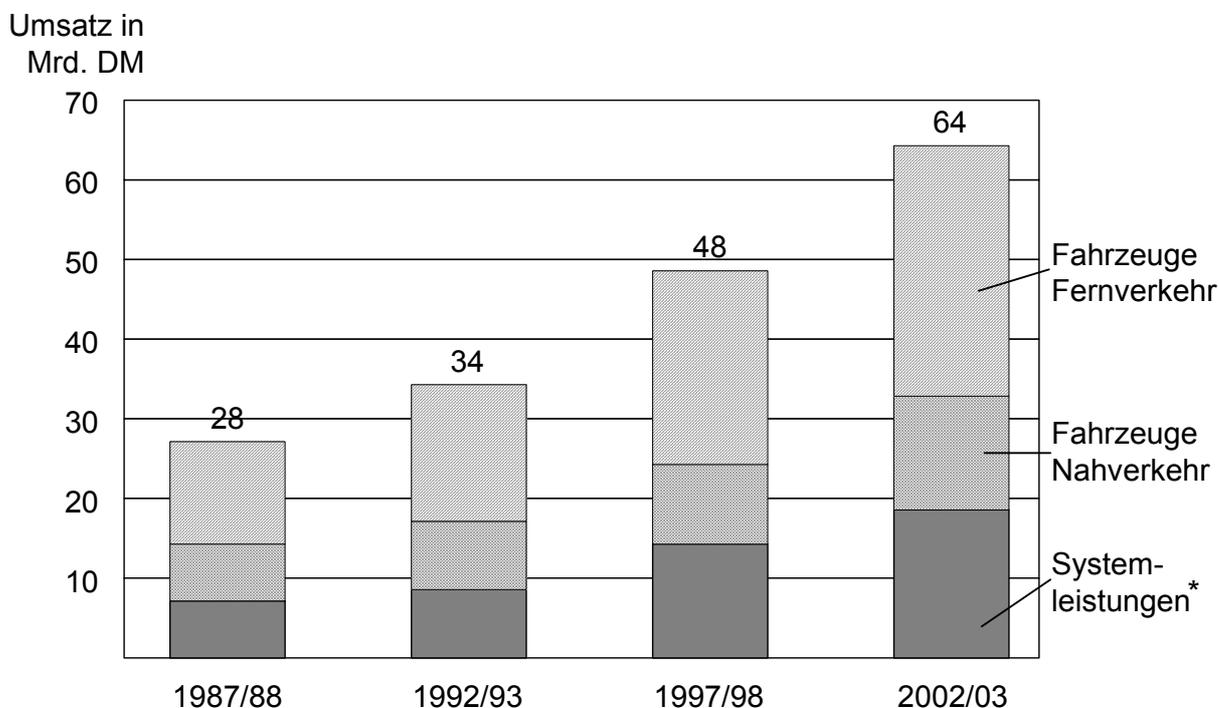


Bild 3 Vom Markt vorgegebene Zielgrößen bei Schienenfahrzeugen

Hinsichtlich der zu fertigenden Stückzahlen und zu erwartenden Umsätze wird der Schienenfahrzeugindustrie ein stetes Wachstum prognostiziert [PES94]. Die geschätzte Entwicklung des Weltmarktes für Schienenfahrzeuge und entsprechender Systemleistungen ist in Bild 4 dargestellt.



\*) = Unter dem Begriff *Systemleistungen* werden Dienstleistungen der Hersteller in Verbindung mit Schienenfahrzeugen, wie Finanzierung, Instandhaltung, Entsorgung etc., zusammengefasst.

**Bild 4** Marktentwicklungen für Schienenfahrzeuge und zugehörige Systemleistungen [PES94]

## 2.2 Variantenvielfalt als Problemstellung

In der vorliegenden Arbeit ist der Begriff Variante, entsprechend dem gängigen Verständnis in der technisch-wissenschaftlichen Literatur, primär auf das Produkt bezogen zu verstehen. Es werden dabei ausschließlich sogenannte äußere Varianten betrachtet. Äußere Varianten besitzen Merkmale, die für den Kunden erkennbar sind und das Produkt in seinen Eigenschaften wesentlich beeinflussen. Die Einflüsse auf die äußere Variantenvielfalt lassen sich nach *BARTUSCHAT* grob in Markteinflüsse, Unternehmensstrategien und Anforderungen aus Gesetzen, Normen, Richtlinien und weitere Rahmenbedingungen unterteilen [BAR94]. Im Gegensatz dazu erfolgt keine weitergehende Betrachtung von sogenannten inneren Varianten, die beispielsweise durch in der Produktion alternativ einzusetzende Baugruppen oder Komponenten

entstehen, die keinen oder für den Kunden einen nicht wahrnehmbaren Einfluss auf die Produkteigenschaften haben. Die DIN 199 definiert Varianten als „Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion mit in der Regel hohem Anteil identischer Gruppen oder Teile“. Übertragen auf den Schienenfahrzeugbau wird der Variantenbegriff in dieser Arbeit auf Geometrie-, Funktions- und Ausstattungsvarianten der Fahrzeuge beschränkt. Unter Geometrievarianten werden dabei Skalierungen der Fahrzeugabmessungen und Formvarianten zusammengefasst. Funktionsvarianten werden durch unterschiedliche Einsatzfälle gebildet, die beispielsweise unterschiedliche Antriebssysteme erfordern, und Ausstattungsvarianten entstehen durch den optionalen Einbau meist großvolumiger Komponenten, wie spezielle Fahrwerke, Toiletten oder Klimaanlage, die infolge ihres Gewichtes und ihrer Funktion Einfluss auf die Fahrzeugstruktur haben.

Schienenfahrzeuge lassen sich in erster Differenzierungsebene in Personen- und Güterfahrzeuge unterteilen. Während sich die Fahrzeuge im Schienengüterverkehrsmarkt weiterhin primär in der technischen Ausführung und weniger in den Anwendungsbereichen unterscheiden, wird im Personenschienenverkehr vorwiegend nach den Anwendungsgebieten der Fahrzeuge, insbesondere den zurückzulegenden Entfernungen und den zu fahrenden Geschwindigkeiten sowie der zu nutzenden Infrastruktur, differenziert. Daraus resultiert die Unterteilung der Fahrzeuge in Stadt- und Nahverkehrsfahrzeuge, Regionalverkehrsfahrzeuge, Regionalschnellverkehrsfahrzeuge und Fern- bzw. Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge. Nachfolgende Tabelle zeigt die Merkmale einer Unterteilung von Schienenfahrzeugtypen nach Einsatzzweck (Tab. 1).

Fahrzeugtyp / Eigenschaften	Straßenbahnen, Stadtbahnen, U-Bahnen	Regionalzüge	Regionalbahnen, Intercityzüge, Schnellbahnen	Intercityexpresszüge, Hochgeschwindigkeitszüge
Streckenart	Stadtverkehr	Nah-/Regionalverkehr	Regionalschnellverkehr	Fernverkehr
Fahrstreckenlänge	Unter 20 km	Bis 60 km	Bis 150 km	Über 150 km
Höchstgeschwindigkeit der Fahrzeuge	80 km/h	100 km/h	120-140 km/h	über 160 km/h
Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit	30 km/h	40 km/h	60 km/h	Über 80 km/h
Durchschnittliche Fahrzeit	0,5 h	1 h	2 h	Über 2 h

**Tab. 1** Merkmale der Verkehrsträger im Schienenverkehr [BLE98]

Ausgehend von dieser ersten Aufteilung der Fahrzeugtypen nach dem vorrangigen Einsatzzweck verdeutlicht Tab. 2 am Beispiel der Straßenbahnen, dass sich innerhalb der Klassifizierung zahlreiche Strukturvarianten der Fahrzeuge ausprägen, die auf den jeweiligen Einsatzfall und die spezifischen räumlichen und betrieblichen Randbedingungen angepasst sind. Die wesentlichen Variationsparameter, die Einfluss auf die gesamte Wagenkastengeometrie haben, sind dabei die Spurweite und die Fahrzeugbreite, die Flurhöhe und das Lichtraumprofil des Fahrzeugs. Hinzu kommen spezielle geometrische Anpassungen, die sich beispielsweise aus dem Einsatz verschiedener Hauptkomponenten, wie Fahrwerke und Antriebskomponenten, ergeben.

Variationsparameter	Variantenvielfalt	Ausprägungen der Varianten
	Anzahl	Abmessungen [mm]
Spurweite	7	900, 950, 1000, 1100, 1435, 1445, 1456
Fahrzeugbreite	13	2100, 2200, 2300, 2340, 2350, 2400, 2450, 2480, 2500, 2600, 2650, 2654, 2680
Fußbodenhöhe „Niederflur“	15	205, 280, 300, 310, 345, 350, 352, 353, 355, 360, 370, 400, 407, 440, 480
Fußbodenhöhe „Hochflur“	22	525, 530, 560, 580, 587, 600, 605, 610, 650, 700, 710, 720, 780, 835, 850, 870, 873, 875, 880, 900, 910, 925

Tab. 2 Variantenbildung von Straßenbahnen in West-Europa [HON99]

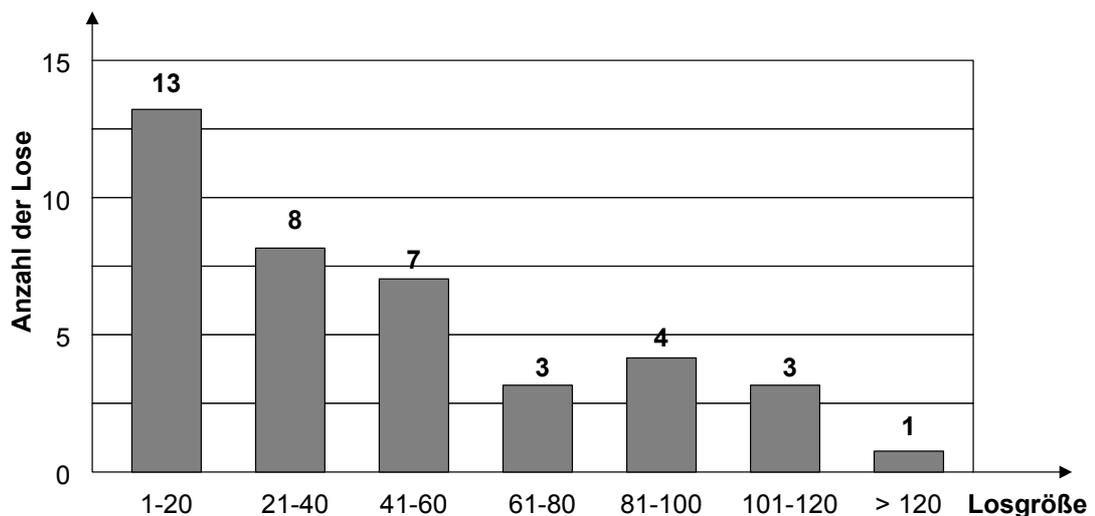
Theoretisch ergeben sich aus der dargestellten Übersicht der Varianten im Straßenbahnbereich eine Variantenvielfalt von über 30.000 Strukturvarianten. Multipliziert man diese Vielfalt mit den in Tab. 1 dargestellten Fahrzeugtypen, so würden sich für einen Hersteller, der den vollständigen Schienenfahrzeugmarkt bedienen möchte, eine theoretische Fahrzeugvielfalt von weit über 100.000 Fahrzeugtypen ergeben, die ausschließlich aus Varianten der Fahrzeugstrukturen resultiert. Ausstattungs- und Traktionsvarianten sind hier noch nicht berücksichtigt.

Das Problem der überhöhten Variantenvielfalt ist für die Verkehrsindustrie nicht grundsätzlich neu. Die Steigerung der Produktvariantenvielfalt im Automobilbau kann am Beispiel des Einheitsautomobils von 1913, des nahezu variantenlosen Ford „Modell T“, gegenüber dem Volumenmodell der Firma Volkswagen AG, dem „VW Golf“

mit theoretisch möglichen 70 Billionen Variationsmöglichkeiten, verdeutlicht werden [RAT93].

Die Schienenfahrzeugindustrie grenzt sich jedoch gegenüber anderen Branchen der Verkehrsindustrie und insbesondere gegenüber der Automobilindustrie durch drei spezifische Probleme bei der Variantenbildung ab:

1. Die Varianten betreffen in hohem Maße die Geometrie und Ausführung der Fahrzeugstruktur,
2. Die Variantenausprägungen sind schwer vom Anbieter vorhersehbar, die Varianten werden auftragspezifisch nach Kundenvorgaben gebildet;
3. Die abzusetzenden Losgrößen pro Fahrzeugvariante sind in der Regel sehr klein, typische Losgrößen liegen beispielweise bei Stadtbahnen zwischen 1 und 60 (s. Bild 5);



Anzahl an erfassten Beschaffungen: 39  
 Gesamtzahl der beschafften Fahrzeuge: 1.851  
 Mittlere Anzahl der Fahrzeuge pro Beschaffung: 47,5

**Bild 5** Auswahl weltweiter Losgrößen bei Nahverkehrsfahrzeugen (Stadtbahnen) [MEY99]

Das Problem der kleinen Losgrößen für die Hersteller verdeutlicht folgende vereinfachte Kalkulation: *Bei einem jährlichen Bedarf von 460 Fahrzeugen im Straßenbahnbereich verbleiben bei der gleichmäßigen Aufteilung auf verschiedene Grundtypen ca. 60 Fahrzeuge pro Fahrzeugtyp und Jahr. Bei einer theoretischen*

weiteren Aufteilung dieser Stückzahl auf ca. 20 Anbieter verbleiben pro Fahrzeugtyp und Anbieter drei Fahrzeuge eines Typs. Mögliche weitere Einsatz-, Ausstattungs- oder Designoptionen können diesen Wert durch zusätzliche Variantenbildung weiter reduzieren [GIE94].

Die zahlreichen Produktvarianten mit den entsprechenden Auswirkungen auf Kosten und Erlöse und die kleinen abzusetzenden Stückzahlen im Schienenfahrzeugbau führen in Verbindung mit den dargestellten markttechnischen Veränderungen zu den heutigen erheblichen produktionstechnischen und wirtschaftlichen Schwierigkeiten der Schienenfahrzeugindustrie. Nachfolgend erfolgt eine Analyse und Klassifizierung der vielfaltbedingenden Gründe sowie eine Betrachtung der direkten Folgen.

### 2.2.1 Klassifizierung der vielfaltbedingenden Gründe

Die Gründe, die zu dem beschriebenen Problem der überhöhten Variantenvielfalt im Schienenfahrzeugbau führen, sind vielfältig. Es erscheint daher sinnvoll, eine Klassifizierung sowie eine Abschätzung der mittelfristigen Entwicklung dieser Gründe vorzunehmen. Während mögliche Entwicklungsszenarien in Kapitel 4.1 eingehend behandelt werden, erfolgt eine Klassifizierung in diesem Kapitel.

Eine anschauliche, zusammenfassende Darstellung der vielfaltbedingenden Gründe bei Schienenfahrzeugen bietet Bild 6.

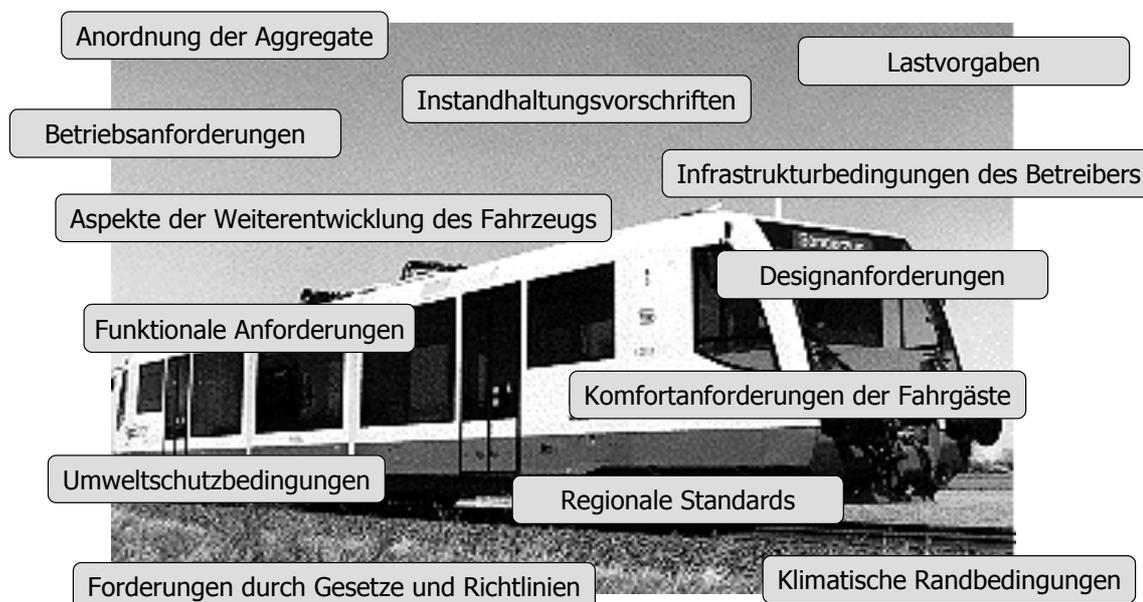


Bild 6 Zusammenfassende Darstellung variierender Anforderungen an ein Schienenfahrzeug

In einer ersten Strukturierung lassen sich die Gründe für die Vielfalt bei Schienenfahrzeugen in *infrastruktur-*, *betriebsbedingte* und *weitere Gründe* einteilen.

### 2.2.1.1 Infrastruktur

Die Netze der Bahnen haben sich historisch relativ autonom entwickelt. Von den daraus resultierenden technischen Unterschieden werden nachfolgend die bedeutendsten aufgeführt:

- *Lichtraumprofil*: Das Lichtraumprofil ist der für das bewegte Fahrzeug freigehaltene Raum und wird durch Bauten, Oberleitungen, Bahnsteige usw. begrenzt (Bild 7).

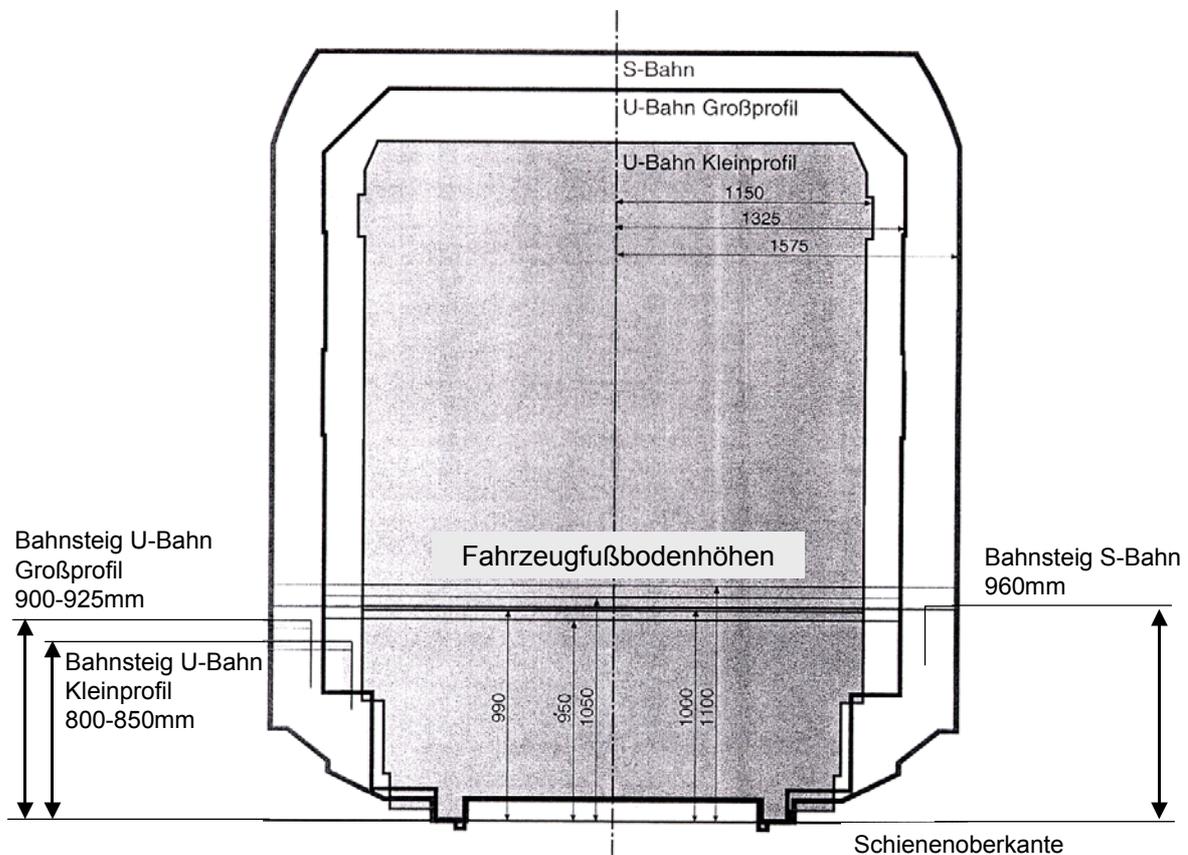


Bild 7 Lichtraumprofile und Bahnsteighöhen im Berliner Schnellbahnnetz

Über das Lichtraumprofil wird die Fahrzeugumgrenzungslinie und damit die maximale Breite und Höhe sowie die Länge des Fahrzeugs, die Einfluss auf zu durchfahrende Kurven besitzt, festgelegt. Der Einsatz eines Fahrzeugs auf Strecken mit unterschiedlichen Lichtraumprofilen ist nur möglich, wenn das kleinste Lichtraumprofil bei der Fahrzeugauslegung zugrundegelegt wurde.

In der obigen Abbildung wird das Problem unterschiedlicher Lichtraumprofile exemplarisch dargestellt: Innerhalb einer Stadt existieren für ein teilweise identisches Einsatzgebiet drei verschiedene Lichtraumprofile, die den Betrieb dreier verschiedener Fahrzeugvarianten oder –typen erfordern.

Für die Straßenbahnen Europas werden in [HON99] 13 verschiedene Fahrzeugbreiten gezählt (von 2100 bis 2680 mm, siehe auch Tab. 2), darunter auch unterschiedliche Fahrzeugbreiten innerhalb eines Verkehrssystems. Dies mag darauf hindeuten, dass insbesondere bei schmalen Fahrzeugen ein hoher konstruktiver Anpassungsaufwand akzeptiert wird, um die mögliche Nutzfläche für Fahrgäste zu maximieren. Das Ziel der Reduktion von Betriebskosten wird demnach durch erhöhte Entwicklungskosten erkaufte.

- *Achs- und Meterlasten*: Die vorgegebenen zulässigen Achs- und Meterlasten dürfen von Fahrzeugen nicht überschritten werden und können damit den netzweiten Einsatz schwerer Fahrzeuge verhindern. Auswirkungen auf die Konstruktion bestehen daher in der Forderung nach einer niedrigen Achslast durch den Einsatz von leichten Werkstoffen für den Wagenkasten, wie Aluminium oder Kunststoff, einem konsequenten Stahlleichtbau und/oder einer hohen Anzahl von Achsen.
- *Spurweiten*: Weltweit existieren vier verschiedene Spurweiten, die mit ihrem prozentualen Anteil am Weltschienenetz kurz aufgeführt werden: Die Meterspur mit 1000 mm zu 7,5% vorwiegend in bergigen Regionen, die Kapspur in Südafrika mit 1067 mm zu 7,7%, die Normalspur mit 1435 mm zu 64% und die russische Breitspur mit 1524 oder 1520 mm zu 11,8%. Die Spurweite von 1435 mm ist damit die weltweit am weitesten verbreitete Spur und wird daher auch Normalspur genannt. Auf dem europäischen Kontinent existieren neben der Normalspur auch die Breitspur (Spanien, Russland) und insbesondere bei schwierigen Trassierungsbedingungen beispielsweise im gebirgigen Gelände (Meterspur Schweiz) Schmalspurbahnen. Obwohl ein direkter Einfluss der Spurweite auf die Fahrzeug- und Wagenkastenkonstruktion über das Fahrwerk hinaus nicht unmittelbar vorhanden ist, existieren kaum Fahrzeuge, die identisch in verschiedenen Spurweiten, beispielsweise in einer Meterspur- und Normalspurausführung, angeboten werden. Die Variation der Spurweite besitzt insbesondere im Straßenbahnbereich eine größere Bedeutung, für den *HONDIUS* in West- und Mitteleuropa sieben verschiedene Spurweiten (900, 950, 1000, 1100, 1435, 1445 und 1456 mm) aufführt.

- *Trassierungsparameter:* Von Bedeutung für die Fahrzeugkonstruktion sind insbesondere Werte der Steigungen, die über die Motorisierung und die notwendige Bremsleistung entscheiden. Aus zu befahrenden Kurvenradien resultiert nicht nur die Konstruktionsvorgaben für die Fahrwerke, sondern es leiten sind daraus auch Anforderungen für den Wagenkasten durch die Bestimmung des Drehzapfenabstandes und die Länge bzw. Breite des Fahrzeugs ab.
- *Bahnsteighöhen:* Um einen möglichst einfachen und komfortablen Zugang zum Fahrzeug zu ermöglichen, muss der Einstieg des Fahrzeugs auf die Bahnsteighöhe abgestimmt sein. Da eine Angleichung der unterschiedlichen Bahnsteighöhen nur mit sehr hohem baulichen Aufwand zu erreichen wäre, ist eine Anpassung des Fahrzeugs an die unterschiedlichen Höhen erforderlich. Bei Fahrzeugen, die ein weites heterogenes Netz befahren, lässt sich dies nur durch Stufen und Treppen im Einstieg erreichen. Bei Fahrzeugen, die ein homogenes (Teil-) Netz befahren, ist eine Anpassung an die vorherrschende Bahnsteighöhe mit dem Ziel eines niveaugleichen Zugangs im Interesse des Fahrgastkomforts und des schnellen Fahrgastwechsels sinnvoll. Hierbei ist zur weitgehenden Vermeidung von Stufen am als auch im Fahrzeug eine Anpassung der gesamten Fahrzeugkonstruktion an die entsprechenden Bahnsteighöhen erforderlich.

### 2.2.1.2 Betrieb

- *Fahrzeugkapazität:* Ziel jeder Fahrzeugkonstruktion ist es, ein Maximum an Nutzfläche bzw. Fahrzeugkapazität unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen zu erreichen. Dabei ist es von den Streckenbedingungen und dem Betriebskonzept abhängig, wie dieses Ziel erreicht werden kann und welche absolute Kapazität erreicht wird. Bei Einzelwagenzügen sind Länge und Breite der Wagenkästen in Grenzen variabel und es besteht die Möglichkeit der Doppelstöckigkeit. Bei Gliederzügen kann auch die Zahl der Wagenteile angepasst werden. Dieses Konzept erlaubt eine sehr große Flexibilität, gleichzeitig können weitgehend einheitliche Wagen eingesetzt werden.
- *Antriebssystem und Traktionsart:* Das Antriebssystem wird durch die geforderte Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrzeugs und die infrastrukturellen Voraussetzungen sowie durch das Streckenprofil bestimmt. Geschwindigkeit und Beschleunigungsvermögen werden bei gegebenem Fahrzeugkonzept durch die Leistung der Antriebsanlage bestimmt. Der Platzbedarf der Antriebsanlage wächst dabei jeweils mit der Leistungsfähigkeit, so

dass auch eine Anpassung der Fahrzeugstruktur in Abhängigkeit von diesen Parametern nötig sein kann.

### 2.2.1.3 Weitere Gründe

- *Technische Regeln und Vorschriften:* Der Betrieb von Schienenfahrzeugen erfordert die Einhaltung verschiedener technischer Regeln und Vorschriften. An erster Stelle zu nennen sind hier Anforderungen an die Längsdruckfestigkeit, die das Fahrzeugkonzept und die Gestaltung des Wagenkastens wesentlich bestimmt. Diese Anforderung kann in Abhängigkeit vom Einsatzzweck und der technischen Ausrüstung der Fahrzeuges nach geltender Europäischer Norm zwischen 1.500 kN und 600 kN schwanken, woraus sich erhebliche Strukturunterschiede ableiten lassen [DIN EN 12663]. Eine Angleichung der bisweilen zwischen den Ländern stark divergierenden Anforderungen und Vorschriften, beispielsweise an die Fahrzeugstruktur und die strukturbedingten Crasheigenschaften, wird zumindest innerhalb der EU derzeit zwar vorangetrieben, eine daraus resultierende tatsächliche Reduzierung der Varianten bei Schienenfahrzeugen ist jedoch unmittelbar nicht zu erwarten.
- *Fahrzeugdesign:* Insbesondere in den Bereichen des Schienenpersonenverkehrs, in denen ausgeprägter Wettbewerb zwischen den Anbietern herrscht, nimmt das Design der Fahrzeuge eine wichtige Rolle ein. Neben der Attraktivität für den Fahrgast soll auch eine eigenständige Identität des Verkehrsbetriebs durch das Aussehen des Fahrzeugs erreicht werden. Neben der Farbgebung des Fahrzeugs und der Gestaltung des Innenraums wird der Fahrzeugkopf von Triebwagen verstärkt als das entscheidende Gestaltungs- und Unterscheidungsmerkmal sowohl von Hersteller- als auch Betreiberseite gesehen. Mit Ausnahme des Fahrzeugkopfes wird ein Fahrzeugdesign kaum auf Betreiberwunsch geändert, wenn dies umfangreiche Änderungen der Fahrzeugkonstruktion nach sich zieht. Der Einfluss von Designanforderungen auf die Fahrzeugstruktur über das oben gesagte hinaus ist aus diesem Grund nicht zu erwarten und wird daher nicht weiter betrachtet.
- *Industriestrukturelle und industriepolitische Gründe:* In der Vergangenheit zeichnete sich die Schienenfahrzeugindustrie durch eine große Vielfalt an nationalen und regionalen Anbietern aus. Bereits diese Vielfalt an Fahrzeugherstellern, die sämtlichen Kundenwünschen nachkamen und „ihre Ehre darin suchten“ oder „ihre Stärke darin fanden“, eigene Lösungen und Produkte zu entwickeln, stand einer Standardisierung entgegen [ECK00, SCH94]. So do-

kumentiert auch eine aktuelle Untersuchung im Nahverkehrsbereich 30 verschiedene Einstiege mit 50 verschiedenen Türen, und 25 unterschiedliche Antriebe bei 10 verschiedenen Steuerungen [ERI98]. Da die Verkehrsbetriebe fast ausschließlich in öffentlicher Hand waren, wurden Aufträge auch aus industriepolitischen Erwägungen heraus an regionale bzw. nationale Anbieter vergeben. Die resultierende Vielzahl an technischen Lösungen und unterschiedlichen Entwicklungen war dadurch zum Teil politisch motiviert. Die heutige starke Konzentration des Herstellermarktes und der ausgeprägte Wettbewerb der Betreiber und Hersteller stehen aber der Fortsetzung dieser Politik deutlich entgegen.

- *Local-content-Forderungen*: Das Motiv der Förderung nationaler bzw. lokaler Unternehmen bei der Vergabe von Fahrzeugbestellungen findet sich in den Forderungen im Rahmen des Exportgeschäftes nach local-content wieder. Hiermit wird die Forderung nach Beteiligung der nationalen oder regionalen Unternehmen des Fahrzeugkäufers an der Wertschöpfungskette beschrieben. Die Auswirkungen solcher Forderungen sind vom Hersteller kaum vorhersehbar und können beispielsweise Eingriffe in die Fahrzeugkonzeption, Anpassung eines Fahrzeugkonzeptes an vorhandene Fertigungskompetenzen und Betriebsmittel im Exportland, sowie die Verlagerung und Anpassung einzelner Fertigungsschritte in das Exportland sein [ALT99]. Als praktisches Beispiel kann hier ein Regionalfahrzeug genannt werden, das ursprünglich in Aluminiumintegralbauweise gefertigt wurde, und explizit in Folge von Anforderungen des Exportlandes als Fahrzeug in Stahlbauweise umgestaltet wurde.

In der folgenden Tabelle werden die beschriebenen Gründe für die Variantenvielfalt bei Fahrzeugen des Schienenverkehrs zusammengefasst.

Unterschiedliche Anforderungen im Bereich...	...erfordern fahrzeugseitig...	...und betreffen vorwiegend...
Lichtraumprofil	entweder die Wahl des durchgängig kleinsten Lichtraumprofils oder Gestaltung verschiedener Fahrzeuge nach den Bedingungen von Teilnetzen	die komplette geometrische Gestaltung des Wagenkastens
Achs- und Meterlasten	entweder die Wahl der niedrigsten Achslast oder Gestaltung verschiedener Fahrzeuge nach den Bedingungen von Teilnetzen	das gesamte Fahrzeugkonzept sowie dessen Bauweise und die einzusetzenden Werkstoffe
Spurweite	die Anpassung an die gegebene Spurweite	das Fahrwerk, ggf. den Wagenkasten oder auch das gesamte Fahrzeugkonzept

Unterschiedliche Anforderungen im Bereich...	...erfordern fahrzeugseitig...	...und betreffen vorwiegend...
Kurvenradien	entweder die Wahl der kleinsten zu befahrenden Radien oder Gestaltung verschiedener Fahrzeuge nach den Bedingungen von Teilnetzen	die Wagenkastenlänge und den Drehzapfenabstand, d.h. die Fahrzeuggeometrie
Bahnsteighöhe	Gestaltung des Einstiegs für verschiedene Bahnsteighöhen oder Anpassung des Fahrzeugs an die Bedingungen von Teilnetzen	die Einstiegssektion und/oder die Fußbodenhöhe und damit die Wagenkastenkonstruktion und -geometrie
Antriebssystem	die generelle Nutzung der infrastrukturunabhängigen Dieseltraktion, die Anpassung des Antriebssystems oder die Mehrsystemfähigkeit	den Antrieb, ggf. die Wagenkastengeometrie
Fahrzeugkapazität	eine Anpassung von Fahrzeuglänge oder -breite sowie die Fahrzeugkonfiguration	das Fahrzeugkonzept, den Wagenkasten, die Geometrie
Design	in Abhängigkeit von den Forderungen eine entsprechende Anpassung des Designs	den Fahrzeugkopf, die Lackierung bis zum Gesamtfahrzeugdesign
Vorschriften, Normen	Erfüllung ist obligatorisch zur Zulassung	das gesamte Fahrzeugkonzept
industriestrukturelle und politische Gründe	siehe Text	zum Teil das gesamte Fahrzeugkonzept und dessen Bauweise

**Tab. 3** Zusammenfassung der Gründe für die Fahrzeugvielfalt

## 2.3 Folgen der Variantenvielfalt

### 2.3.1 Hersteller

Für die Fahrzeughersteller äußert sich die hohe Variantenvielfalt im Schienenfahrzeugbau insbesondere in Verbindung mit den kleinen abzusetzenden Losgrößen in verschiedenen negativen Aspekten, die nachfolgend stichwortartig aufgeführt sind:

- Erhöhter Entwicklungs- und Anpassungsaufwand,
- Zahlreiche produktspezifische Vorrichtungen und daraus resultierend hohe Fixkostenanteile,
- Unzureichende Nutzung von Prozesswissen und Erfahrungen,
- Hohe variantenbedingte Komplexität in Entwicklung, Fertigung und Logistik,
- Geringe Möglichkeiten zur auftragsunabhängigen Vorfertigung,
- Hoher Zeitdruck während der Entwicklungs- und Produktionsphase sowie eine

- Unzureichende Nutzung von Mengenvorteilen (economies of scale).

Bild 8 verdeutlicht die Problematik der hohen Fixkosten bei kleinen Auftragsgrößen für die Hersteller.

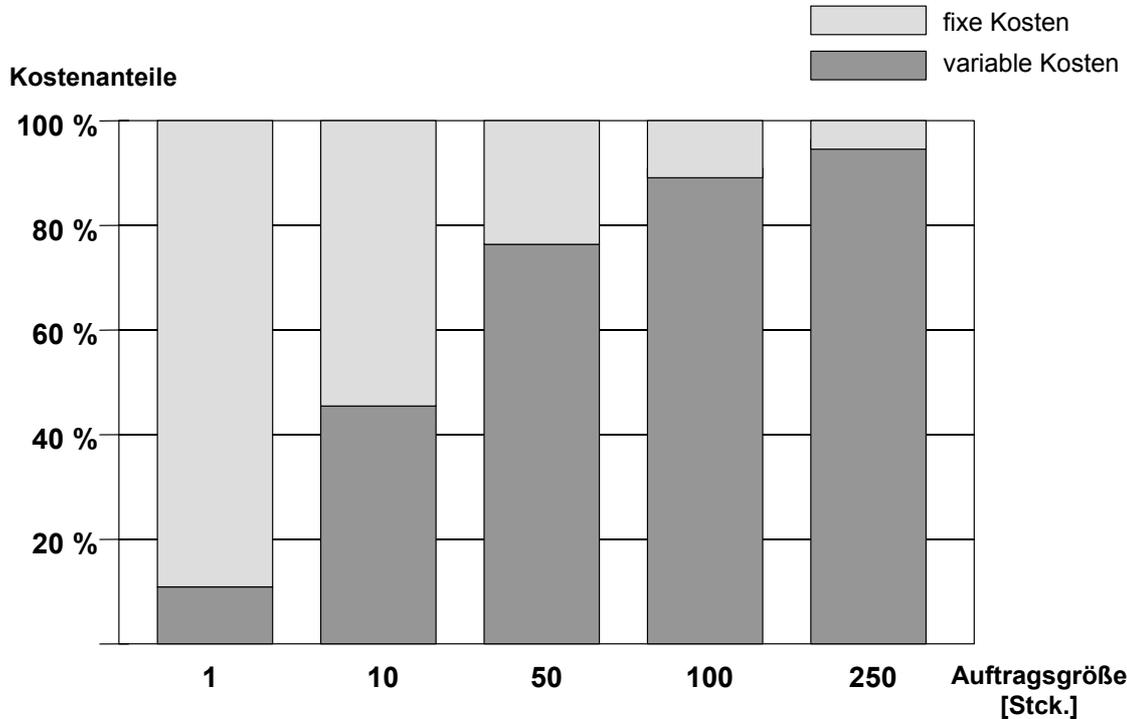
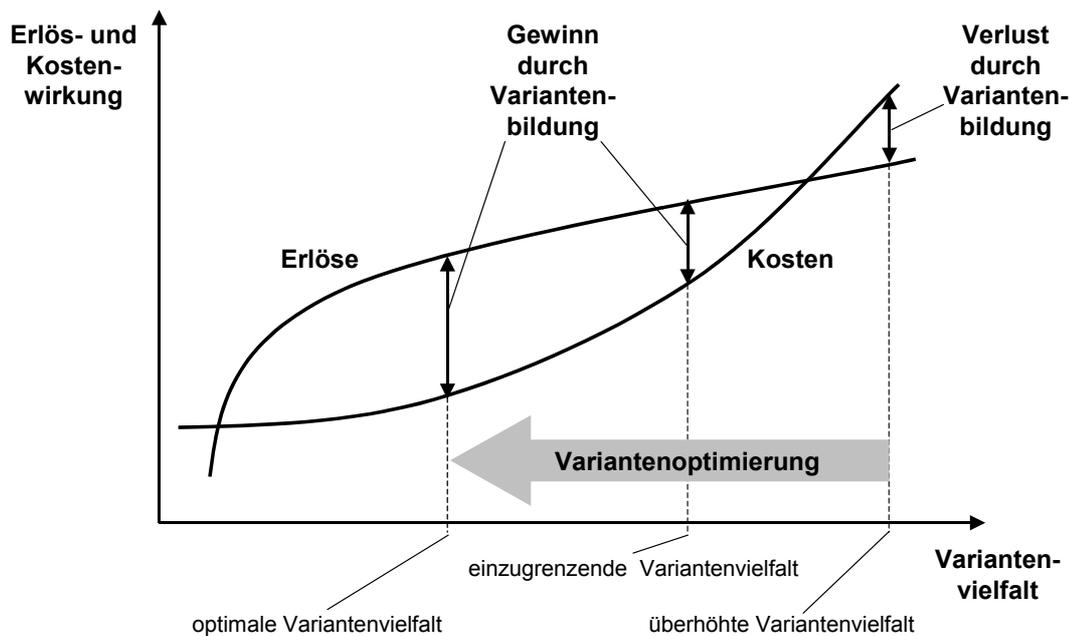


Bild 8 Fixe und variable Kostenanteile im Schienenfahrzeugbau in Abhängigkeit zur Auftragsgröße [ALT97]

Zwischen der Variantenvielfalt und den für den Hersteller entstehenden Kosten bzw. den zu erzielenden Erlösen besteht ein enger Zusammenhang [GEM98]. Produktvarianten führen meist auch zu Varianten innerhalb von Produktionsabläufen und der Logistik. Dies wird bei *BARTUSCHAT* und *EVERSHEIM* allgemein auch als Artvarianz, d.h. als Kombination der Produkt- und Produktionsvarianz, bezeichnet [BAR94, EVE89]. Den Einfluss der Variantenvielfalt auf Kosten und Erlöse verdeutlicht Bild 9.



**Bild 9** Einfluss der Variantenbildung auf Kosten und Erlöse [GEM98]

### 2.3.2 Betreiber

Die Variantenvielfalt bei Schienenfahrzeugen führt auch für den Betreiber als Auftraggeber zu einer Reihe von Nachteilen, die sich unter anderem in höheren Fahrzeugkosten und der Steigerung der variantenbedingten Komplexität durch beispielsweise produktspezifische Instandhaltungsprozeduren und –werkzeuge widerspiegeln. Dies verdeutlicht, dass die differierenden Anforderungen der Betreiber an die Hersteller weniger aus Gründen eines beeinflussbaren Strebens nach Individualität als vielmehr in Folge unterschiedlicher Betriebs- und Einsatzkonzepte, unterschiedlicher Streckentopologien, infrastruktureller Randbedingungen sowie betreiberspezifischer technischer Voraussetzungen und Werkstattmöglichkeiten entstehen. Die dominierenden Auswirkungen einer hohen Variantenvielfalt für den Betreiber werden nachfolgend genannt.

- **Lieferzeit:** In Abhängigkeit des erforderlichen Änderungsaufwandes für den geforderten Fahrzeugtyp, der sich aus der konstruktiven Abweichung von einer anbieterspezifischen Variante ergibt, müssen umfangreiche Entwicklungs- und Konstruktionsphasen sowie Teile der Produktionsvorbereitung neu durchlaufen werden. Weiterhin werden für neue Fahrzeugvarianten vielfach entsprechende produktspezifische Vorrichtungen benötigt, die konstruiert, gefertigt oder beschafft sowie in die Produktion eingeführt werden müssen.

Weicht ein Fahrzeugkonzept von einem zugelassenen Typ erheblich ab, so ist das Fahrzeug von einer entsprechenden Behörde abzunehmen und neu zuzulassen. Diese Prozesse können einen bedeutenden Anteil an der Lieferzeit ausmachen. Der verbreitete Einsatz von anbieterseitig bekannten, erprobten und zugelassenen Konstruktionen und Komponenten kann zu einer Verkürzung der Durchlaufzeit führen.

- **Zuverlässigkeit:** Der Einsatz neuer Konstruktionen und Komponenten muss nicht zwangsläufig die Zuverlässigkeit verringern, doch zeigen einschlägige Praxisfälle, wie der Neigezug ET 611/612 oder der Regionalzug INTEGRAL, dass die meisten komplexen technischen Produkte des Schienenverkehrs in der Anfangsphase ihres Einsatzes vielfach noch technische Fehler aufweisen, die erst im Betrieb erkannt werden. Insbesondere der wirtschaftlich nicht mehr mögliche Bau und das Testen von physischen Prototypen, die heute durch digitale Prototypen ersetzt werden, führt zunehmend zu einer Häufung von Pannen und Funktionsfehlern im realen Betrieb. Fehlfunktionen müssen aus diesem Grund häufig während des Betriebs korrigiert werden und führen neben der Verärgerung der Fahrgäste zu einer Einschränkung der Verfügbarkeit und einer verringerten Zuverlässigkeit. Der Einsatz bekannter und bewährter technischer Lösungen mindert das Risiko der nicht vorhersehbaren Fehler und erlaubt durch die Erfahrung mit bekannten Bauteilen eine genauere Aussage über deren Zuverlässigkeit über die Zeit, die vielfach vom Hersteller gegenüber dem Betreiber garantiert werden muss.
- **Ersatzteilverfügbarkeit:** Mit der Zahl der eingesetzten Bauteile und Komponenten steigt auch die Zahl der vorzuhaltenden Ersatzteile. Sind diese Bauteile keine Großserienkomponenten sondern Sonderanfertigungen, steigen nicht nur die Bauteilkosten sondern auch die Lieferzeiten in Folge von Sonderanfertigungen erheblich. Allein um eine daraus resultierende umfangreiche und damit unwirtschaftliche Lagerhaltung von Ersatzteilen zu vermeiden, ist eine Standardisierung mindestens auf Komponentenebene anzustreben [GIE94].

Das nachfolgende Kapitel zeigt den derzeitigen Technikstand bei Bauweisen und Fertigungsverfahren im Schienenfahrzeugbau auf, mit dem Hersteller und deren Wertschöpfungspartner auf die beschriebenen Marktbedingungen reagieren. Neben dem kostenmäßigen Vergleich einzelner Bauweisen erfolgt darüber hinaus die Ableitung der derzeit bestehenden Defizite in der Produktstrukturierung und der Fertigung.

### 3 Stand der Technik

Das Kapitel Stand der Technik beschreibt technische Lösungen zur Herstellung von Schienenfahrzeugen. Es wird dabei sowohl auf das Produkt als auch auf die zugehörigen Prozesse eingegangen. Am Schluss des Kapitels erfolgt eine Zusammenfassung der produkt- und prozessbezogenen Defizite in Hinblick auf die Anforderungen einer hohen Variantenvielfalt.

#### 3.1 Aufbau von Wagenkästen bei Schienenfahrzeugen

Unter dem Begriff Schienenfahrzeug werden verschiedenste schienengebundene Fahrzeugtypen zusammengefasst. Dabei wird im wesentlichen zwischen Lokomotiv- und Waggonbau unterschieden. Aufgrund der signifikanten Unterschiede hinsichtlich produzierter Stückzahl und Fertigungsablauf soll diese Unterscheidung in dieser Arbeit übernommen werden, wobei der Wagenkastenbau der Waggons im Mittelpunkt dieser Arbeit steht. Der Waggonbau wird weiterhin in die Typen Personen- und Güterwagen unterteilt. Aufgrund der höheren Variantenvielfalt und des größeren Fertigungsaufwands von Personenwagen, beziehen sich die folgenden Ausführungen ausschließlich auf Wagenkästen von Personenwagen und Triebwagen. Bild 10 zeigt schematisch als Explosionsdarstellung den grundsätzlichen Aufbau eines derartigen Wagenkastens.

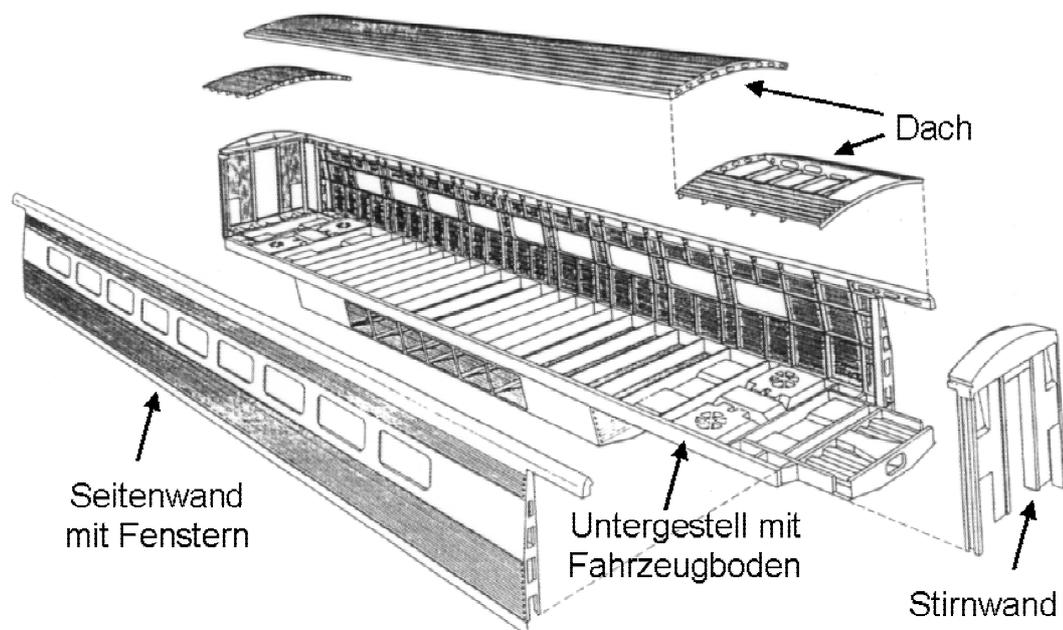


Bild 10 Klassischer Aufbau des Wagenkastens eines Personenwagens [MOL88]

Der Wagenkasten besteht in klassischer Bauweise aus einer einteiligen, röhrenartigen Konstruktion mit stirnseitigen Abschlüssen, die zumeist als Fahrzeugübergänge ausgeführt sind, sowie Türen und Fenstern und ggf. einem Führerhaus. Der Wagenkastenrohbau wird aus einzelnen Komponenten oder Segmenten gefügt und vollständig verschweißt. Nach entsprechenden Nacharbeiten, die meist durch den hohen Wärmeeintrag des Schweißens entstehen, folgen die weiteren Ausbauarbeiten des Wagenkastens, wie Isolierung, Verkabelung und der Innenausbau. Bei moderneren Bauformen erfolgt bereits eine konstruktive und fertigungstechnische Unterteilung in die Sektionen Dach, Seitenwände und Fahrzeugboden bzw. Untergestell.

Personenwagen besitzen als Schnittstelle zum Fahrweg Spurkranzräder, die entweder paarweise auf einer Welle gekoppelt (Radsätze) oder als Einzelräder ausgeführt sind. In Abhängigkeit von der technischen Ausführung des Fahrzeugs kommen Drehgestelle oder Einzelfahrwerke zur Anwendung. Die Anbindung des Fahrwerks an den Wagen erfolgt über das Untergestell, das durch den Fahrzeugboden sowie die unteren Längs- und Querträger gebildet wird. Untergestelle werden vorwiegend in Differentialbauweise aus massiven Stahl- oder Edelstahlhalbzeugen gefertigt. Dem Untergestell kommt eine wesentliche Funktion der Kraftaufnahme und –übertragung zu. So werden neben der Fahrwerksanbindung auch Puffer- und Kuppelkomponenten am Untergestell befestigt, durch die hohe Kräfte, insbesondere Längskräfte, eingeleitet werden. Angebunden an das Untergestell ist der Wagenkasten, der zur Aufnahme der Passagiere sowie sämtlicher Innenausstattungs-komponenten dient.

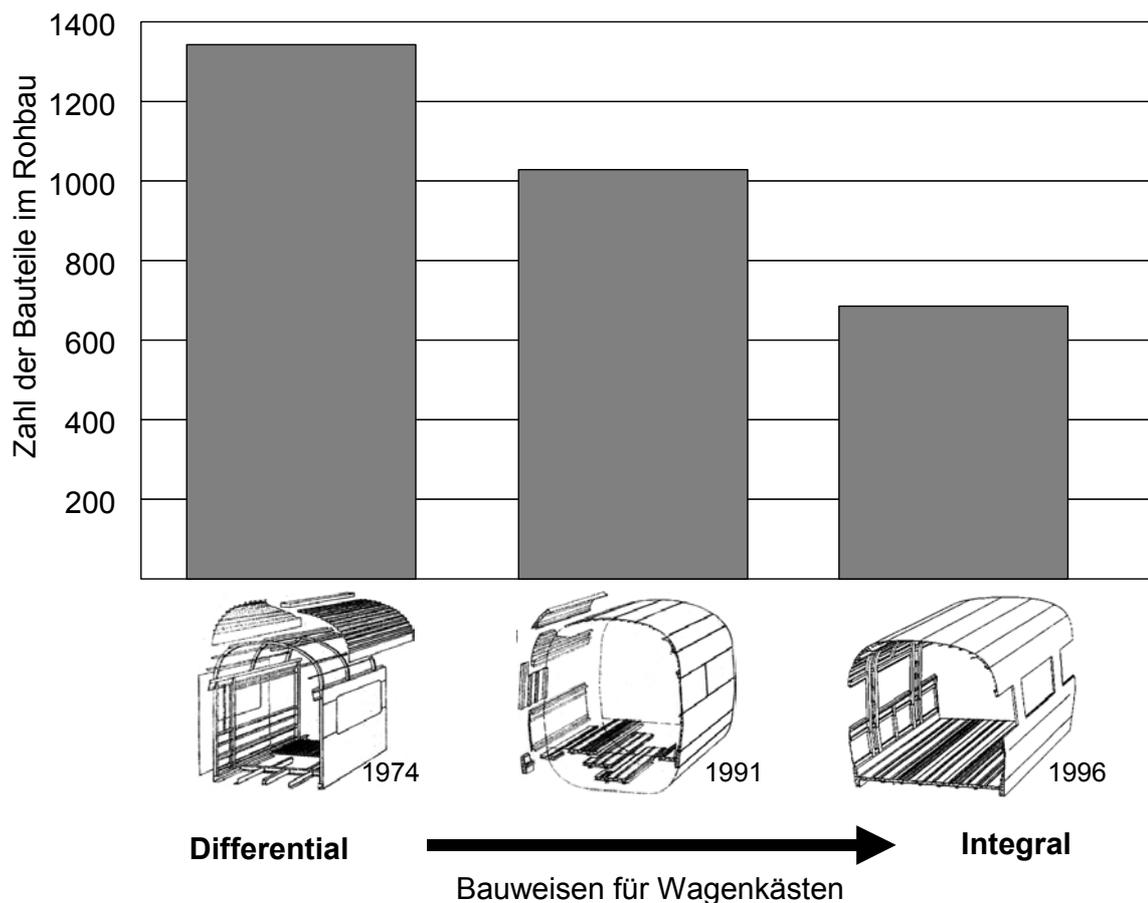
Ausgehend von den 30er Jahren bis Mitte der 80er Jahre blieb der Waggonbau hinsichtlich der Produkt-, Fertigungs- sowie Montagekonzepte prinzipiell ähnlich [ALT92]. Erst Mitte der 80er Jahre wurden neuartige Konstruktionsansätze im Wagenkastenbau entwickelt und zum Teil auch umgesetzt. Grundsätzlich kann bis heute zwischen den folgenden Bauweisen für Wagenkästen unterschieden werden, die nachfolgend vertiefend erläutert werden.

- *Klassische Differentialbauweise*, auch Gerippe-Blech-Bauweise genannt, Blech-Beplankung einer aus Stahl-, Aluminium- oder Edelstahl-Profilen hergestellten Wagenkastenprimärstruktur (skelettartige Stringer- und Spanten-Bauweise); klare Trennung der tragenden und verschalenden Funktionen;
- *Integralbauweise*, auch *Großprofilbauweise* genannt, Verwendung von großformatigen, längsorientierten Aluminium-Strangpressprofilen (vorwiegend für Seitenwände und Dach), die zum Teil in Wagenkastenlänge und einer Breite bis zu 650 mm hergestellt und miteinander in Umfangsrichtung des Wagenkastens gefügt werden; Kombination der tragenden und verschalenden Funk-

tion sowie Integration von weiteren Funktionen (Befestigungselemente etc.) in die Strangpressprofile;

- *Verbundbauweisen*, an die Differentialbauweise angelehnte Fahrzeugstrukturen, bei denen jedoch die Beplankung der metallenen Fahrzeugstruktur durch nichtmetallische Werkstoffe (meist Faserverbundwerkstoffe) erfolgt. Die mechanischen Tragfunktionen werden dabei nahezu ausschließlich über die metallene Primärstruktur übernommen;
- *Sonderbauweisen*, Bauweisen unter Verwendung alternativer, vielfach nichtmetallischer Werkstoffe und innovativer Fertigungsverfahren; Umsetzung heute meist nur für Machbarkeitsstudien und kleinere Sonderanwendungen (Wickel- und Schalenbauweisen);
- *Stahl-Leichtbauweise*, Differentialbauweise unter Einsatz hochlegierter Edelstähle mit verbesserten mechanischen Eigenschaften ermöglicht eine Gewichtsreduzierung und minimiert schweißverzugsbedingte Nacharbeiten; zum Teil verstärkter Einsatz von Kaltfügeverfahren, wie Kleben und Nieten;
- *Hybridbauweisen* nutzen verschiedene, belastungsspezifische Werkstoffe, hauptsächlich Einsatz von Edelstahl- oder Aluminiumstrukturen und großflächigen Kunststoffsegmenten, die zum Teil als Strukturbauteile ausgeführt sind;

Im wesentlichen lassen sich die Bauweisen von Wagenkästen in *Differential-* und *Integralbauweisen* untergliedern. Die vorrangige Motivation bei der Substitution von der Differential- durch die Integralbauweise war die Reduzierung der Bauteile und der erforderlichen Fügeoperationen für den Wagenkasten, sowie der mögliche großflächige Einsatz von Aluminium zur Gewichtsreduktion. Die Weiterentwicklung der Anwendungsmöglichkeiten von Leichtmetall-Großstrangprofilen ermöglichte eine kontinuierliche Reduzierung der Bauteile im Rohbau sowie eine durch die hohe erreichbare Komplexität von Strangpressgeometrien zunehmende Integration von Funktionsträgern, wie Befestigungsschienen und Kanälen, in die großflächigen Profile. Einen Vergleich der Bauteilanzahl zwischen der klassischen Differential-, einer ersten Integral und einer modernen Integralbauweise mit Großstrangprofilen zeigt Bild 11.



**Bild 11** Zahl der Bauteile für unterschiedliche Bauweisen von Wagenkästen [GAB94]

Da einige der genannten Bauweisen prinzipiell auf anderen basieren, werden nachfolgend nur die *Differential-* und die *Integralbauweise*, sowie als Vertreter der Sonderbauweisen die *Wickel- und Schalenbauweise* beschrieben.

### 3.1.1 Differentialbauweise

Das Ende der 20er Jahre begründete Baukonzept der „ganzgeschweißten Stahl-Differentialbauweise“ war ein Durchbruch und blieb über 60 Jahre hinweg vorherrschend im Waggonbau. Bei diesem Konzept der Differentialbauweise, wobei der Begriff die funktionale Trennung zwischen tragender Struktur und Verkleidung unterstreicht, bildet ein Gerippe bzw. ein Fachwerk aus Spanten und Stringern das Profil des späteren Waggons. Um einen geschlossenen Wagen zu erhalten, wird das Gerippe mit Blechen verkleidet. Sowohl die Herstellung des Gerippes als auch die Verkleidung mit Blechen wird vornehmlich mit dem Fügeverfahren Schweißen durchgeführt, wobei zum Teil wagenlange Schweißnähte entstehen. Durch die Ent-

wicklung schweißbarer hochlegierter Werkstoffe, die höhere Festigkeitswerte im Vergleich zu Baustahl aufwiesen, jedoch leichtere Konstruktionen zuließen, konnte eine kontinuierliche Massenreduktion des Rohbaus erreicht werden. Eine weitere Reduktion des Gewichts der Wagenkastenstruktur konnte durch den Einsatz von hochfesten Aluminium- statt Stahlprofilen erreicht werden. Allerdings führte die Verwendung derartiger Werkstoffe dazu, dass die Relation von örtlichen Querschnitten und Widerstandsmomenten zur eingebrachten Schweißwärme immer ungünstiger wurde. Daraus ergaben sich Schrumpfungen und Welligkeiten als stochastische Faktoren, die mit umfangreichen Nacharbeiten, wie Richtarbeiten, großflächigem Schleifen und aufwendigen Spachtelarbeiten, ausgeglichen werden mussten [ALT92]. Weiterhin bedingten die vielen zu verbindenden Bauteile zahlreiche Fügstellen und einen damit verbundenen hohen Fertigungsaufwand. Bild 12 zeigt die „Gerippe-Blech-“ oder „Differentialbauweise“ eines Wagenkastens in einer Explosionsdarstellung.

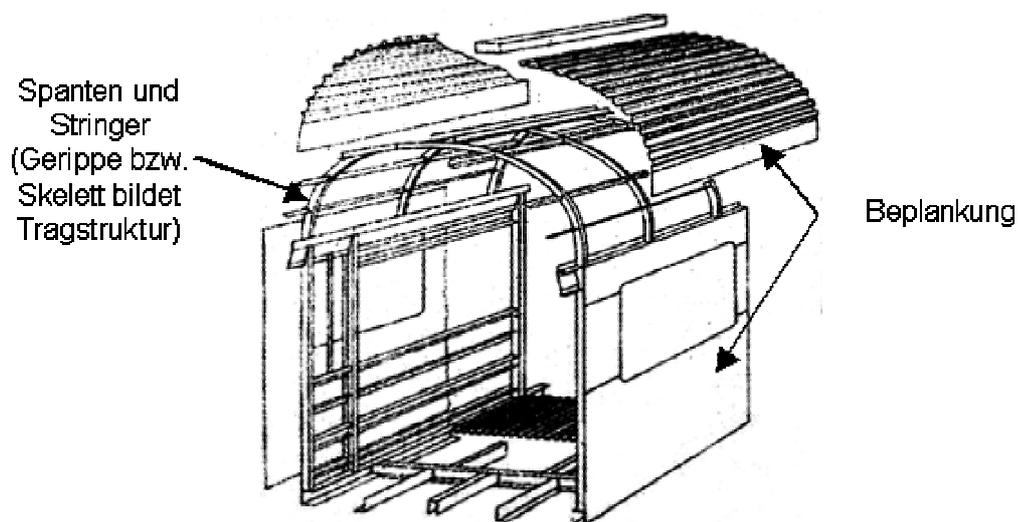


Bild 12 Differentialbauweise im Waggonbau, tragende Skelett-Struktur und Bepankung [HER92]

Den genannten Nachteilen gegenüber steht bei der Differentialbauweise eine höchstmögliche Flexibilität bezüglich der Form des Wagenkastens sowie hinsichtlich des Einsatzes der Materialien und Fügetechniken. Durch den großflächigen Einsatz von einfachen, standardisierten Profilhalbzeugen, die je nach Anforderungen entsprechend umgeformt werden können, besteht eine große Designflexibilität des Wagenkastens.

Die anschließende Bepankung des Gerippes, die meist über dünnwandige, auf Coils gelagerte Bleche erfolgt, passt sich der Kontur des Strukturgerippes an. Dies lässt

eine große Variationsbreite des Wagenkastenprofils unter Beibehaltung der Prozesse und einzusetzenden Werkzeuge zu. Die Fixkosten für Werkzeuge etc. sind damit weitgehend unabhängig von der Anzahl der Formvarianten des Wagenkastens.

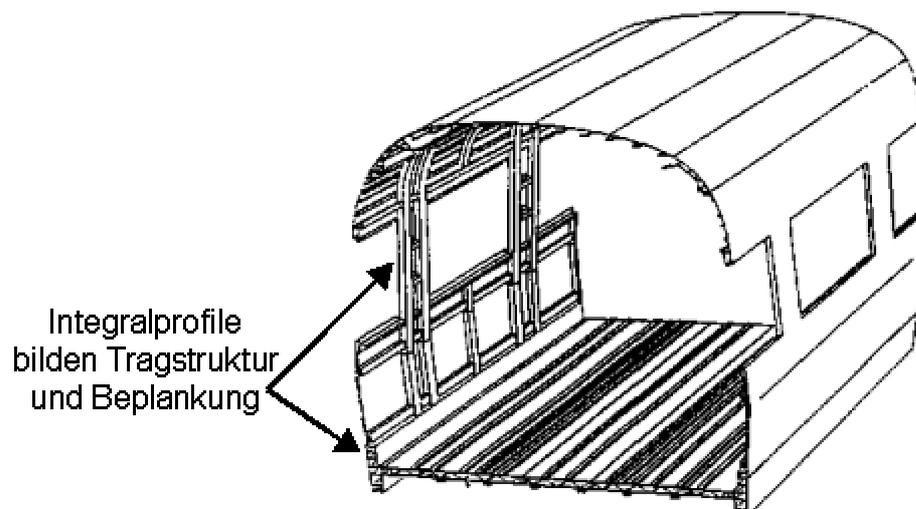
Weiterhin ermöglicht die Differentialbauweise in Folge der funktionalen Trennung zwischen den mechanischen und verkleidenden Komponenten den Einsatz unterschiedlicher Materialien für das Gerippe und die Beplankung. So wurden im Laufe der Entwicklung der Differentialbauweise hochlegierte Stahlwerkstoffe für die Struktur eingesetzt, die zum Teil einen beachtlichen Leichtbaugrad ermöglichten. Weiterhin schaffte der verstärkte Einsatz von alternativen, wärmelosen Fügeverfahren die Voraussetzungen für die Umsetzung von hybriden Werkstoffkombinationen. Hierbei werden neben hochlegierten Metallen auch zunehmend Faserverbundkunststoffe sowohl für die Beplankung als auch für Strukturelemente des Gerippes eingesetzt [ALT99]. Aufgrund ihrer hohen Flexibilität, den alternativ einzusetzenden Materialien und den geringen produktspezifischen Betriebsmitteln findet die Differentialbauweise insbesondere für kleinere Fahrzeugserien auch heute noch verbreitete Anwendung.

### **3.1.2 Integralbauweise**

Mit der Weiterentwicklung der Aluminium-Strangpresstechnik in Form von Pressen, die Vollprofile von bis zu 700 mm Breite und Hohlprofile von 550 mm Breite produzieren konnten, hielt Anfang der 70er Jahre die „Großprofil-“ bzw. „Integralbauweise“ Einzug in den Waggonbau [CAB92, KAW92].

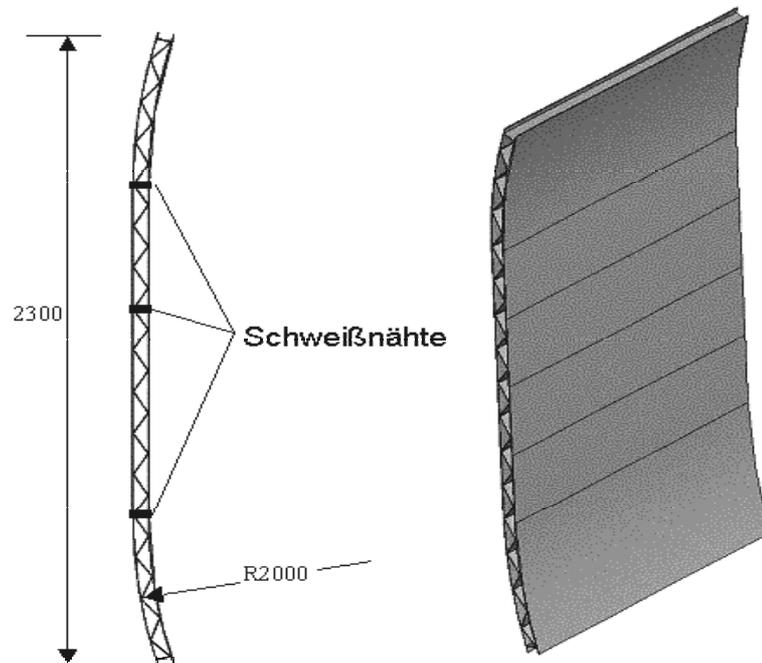
Hierbei wird der Wagenkastenrohbau zu rund 80% aus großformatigen, bis zu 650 mm breiten Strangpressprofilen gefertigt. Durch die profilierte Struktur dieser Bauteile wird eine Steifigkeit erreicht, die die Herstellung und Verwendung eines separaten tragenden Gerippes, wie es bei der Differentialbauweise erforderlich ist, überflüssig macht.

Bild 13 zeigt die Integralbauweise anhand eines Wagenkastenquerschnitts als Explosionszeichnung.



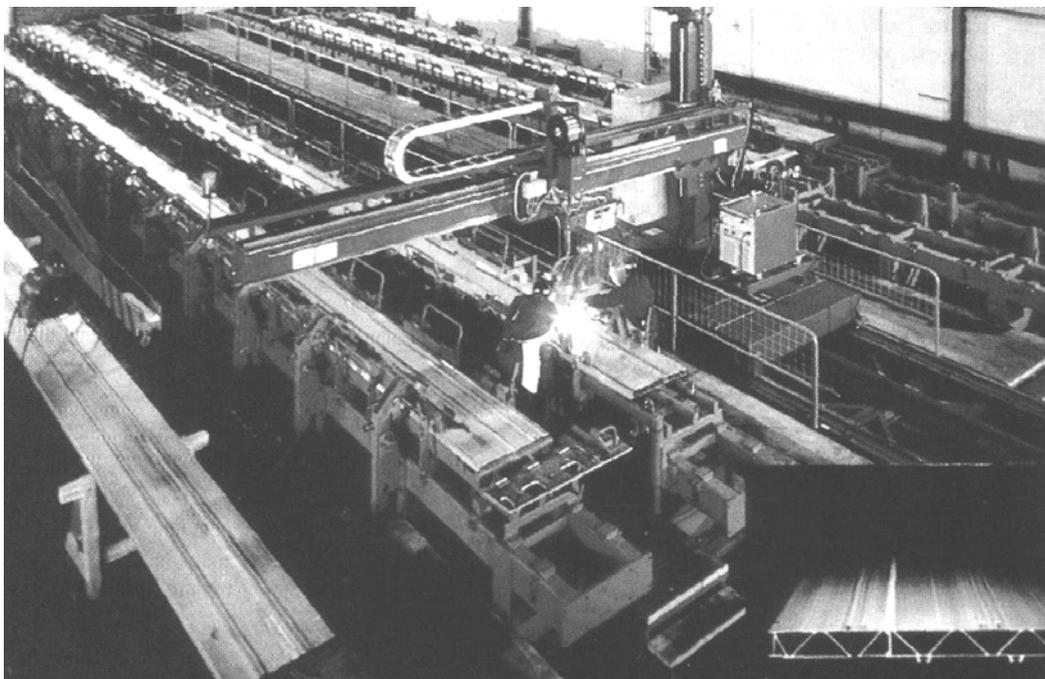
**Bild 13** Integralbauweise im Waggonbau, Integration von Tragstruktur und Beplankung [CAB92]

Die Wagenkastenstruktur der Integralbauweise beruht auf Profilen vielgestaltigen Querschnitts, die die mechanischen und verarbeitungstechnischen Eigenschaften von Aluminium nutzen und die Bauteilvielfalt und –menge minimieren (Bild 14) [HER92, KAW92]. Die einzelnen Profilsegmente, die etwa 5-10 verschiedenartige Geometrien aufweisen, werden aneinandergesetzt und miteinander verschweißt und erstrecken sich zum Teil über die gesamte Länge des Wagenkastens. Der Einsatz großflächiger Strangpressprofile reduziert den Montageaufwand in der Rohbaufertigung und vereinfacht die Komplettierung des Waggons durch die Integration von Befestigungsschienen, wie C-Schienen oder Winkelprofilen, für den Innenausbau.



**Bild 14** Seitenwandsegment aus längsverschweißten Aluminium-Großprofilen

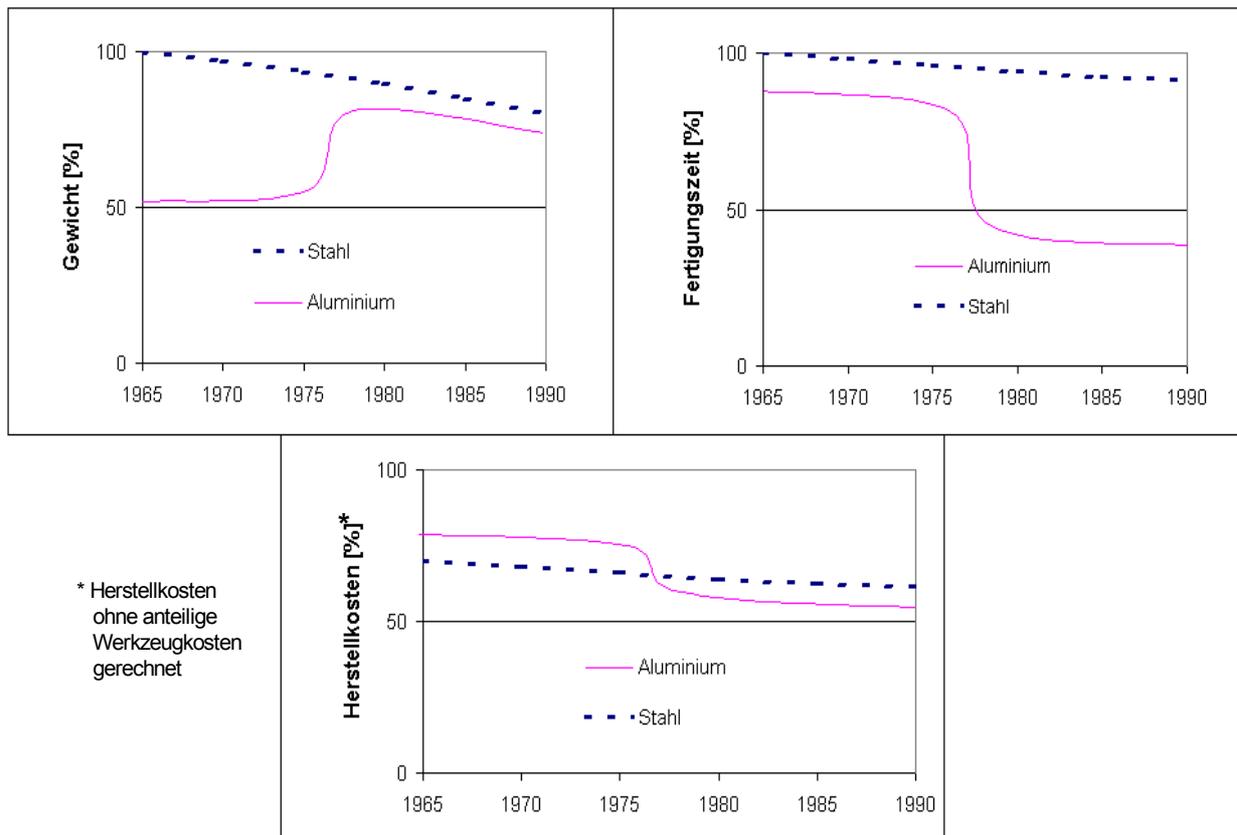
Die einzelnen Strangpressprofile werden im allgemeinen durch numerisch gesteuerte Großschweißanlagen durch kontinuierliches Schweißen in Fahrzeuglängsrichtung zu großflächigen Wagenkastensegmenten miteinander verbunden (**Bild 15**).



**Bild 15** Fügen von Aluminium-Strangpressprofilen mit Großschweißanlagen [LUT99]

Zur Herstellung dieser Profile ist für jedes Profil ein individuelles Werkzeug erforderlich. Dieses Strangpresswerkzeug muss speziell entwickelt und gefertigt werden, wodurch die betriebsmittelbedingten Fixkosten steigen und die Flexibilität bei Produktänderungen reduziert wird. Beispielhaft sei hier ein entsprechendes Werkzeug für ein komplexes Hohlkammerprofil-Seitenwandsegment mit Werkzeugkosten in Höhe von etwa 500.000 DM aufgeführt [HER92]. Aufgrund der erhöhten Fixkosten durch die Werkzeugbeschaffung ist der Waggonbau in Integralbauweise deshalb im Vergleich zur Differentialbauweise erst bei größeren produzierten Stückzahlen rentabel. Mit dieser Bauweise und den damit verbundenen Fertigungsverfahren können jedoch die Nachteile, die sich durch den schweißwärmebedingten Verzug des Wagenkastenrohbaus ergeben, nicht vollständig neutralisiert werden. Aus diesem Grund werden auch hier zunehmend wärmelose Fügetechniken eingesetzt, die meist eine Kombination aus Form- und Kraftschluss bewirken. Ein konstruktiver Nachteil dieser Bauweise besteht darin, dass die Wandstärke oder Profilstruktur in Längsrichtung nicht den Bedürfnissen nach festigkeitsrelevanter Auslegung angepasst werden kann, da die Profile fertigungsbedingt über die Länge einen unveränderbar konstanten Querschnitt aufweisen.

Bild 16 vergleicht die Entwicklung von Gewicht, Fertigungszeit und Herstellkosten bei der Umstellung von einer Aluminiumdifferential- zur Aluminiumintegralbauweise nach 1975 im Vergleich zur Stahldifferentialbauweise. Dabei wird insbesondere der Vorteil der Integralbauweise hinsichtlich der Fertigungszeit deutlich.



**Bild 16** Vergleich der Bauweisen Stahl-Differential- und Aluminium-Integralbauweise hinsichtlich Gewicht, Fertigungszeit und Herstellkosten [HER92]

### 3.1.3 Sonderbauweisen (Wickel- und Schalenbauweise)

Mit dem primären Ziel einer weiteren Massenreduktion im Waggonbau werden zunehmend neben metallischen Werkstoffen auch Kunststoffe, vorwiegend faserverstärkte Kunststoffe (FVK), im Wagenkastenbau eingesetzt. Die herausragenden, gewichtsspezifischen Eigenschaften von FVK, die sehr gute Materialdämpfung, die hohe Beständigkeit gegen Umweltbelastungen und die hohe zu erzielende Funktionsintegration sowie die mögliche beanspruchungsgerechte Auslegung des Werkstoffs lassen FVK als einen aussichtsreichen Werkstoff für bahntechnische Anwendungen erscheinen. Zur Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen existieren zahlreiche Fertigungsverfahren. Für die Anwendung im Wagenkastenbau werden in erster Linie Pressenverfahren und Wickelverfahren eingesetzt. Bei der Verwendung von großflächigen Pressenteilen aus FVK wird die üblicherweise in Stahlblech ausgeführte Beplankung einer Differentialbauweise durch großflächige Kunststoffkomponenten ersetzt. Durch die schubweiche Anbindung der FVK-

Komponenten an das Gerippe, die zumeist über Dickschichtklebetechnologien erfolgt, wird die tragende Strukturfunktion in erster Linie weiterhin über die metallischen Spanten und Stringer übernommen.

Um die spezifischen Vorteile von Verbundkunststoffen konsequent weitergehend zu nutzen, werden FVK-Bauteile zunehmend auch als Primärbauteile in der Waggonstruktur eingesetzt. Ein innovatives Konzept nutzt dabei die Fertigungstechnologie des Wickelns für den Wagenkasten. Der gesamte Wagenkasten einschließlich der Komponenten der Innenausstattung wird dabei in einem kontinuierlichen Wickelprozess auf einem produktspezifischen Kern als Integralbauteil hergestellt. Aufgrund des Volumens von Wagenkästen sind hierfür zur automatisierten Herstellung investitionsintensive Großwickelmaschinen erforderlich. Bild 17 zeigt den Vorgang des Wickelns eines Wagenkastens auf einer Großwickelmaschine.

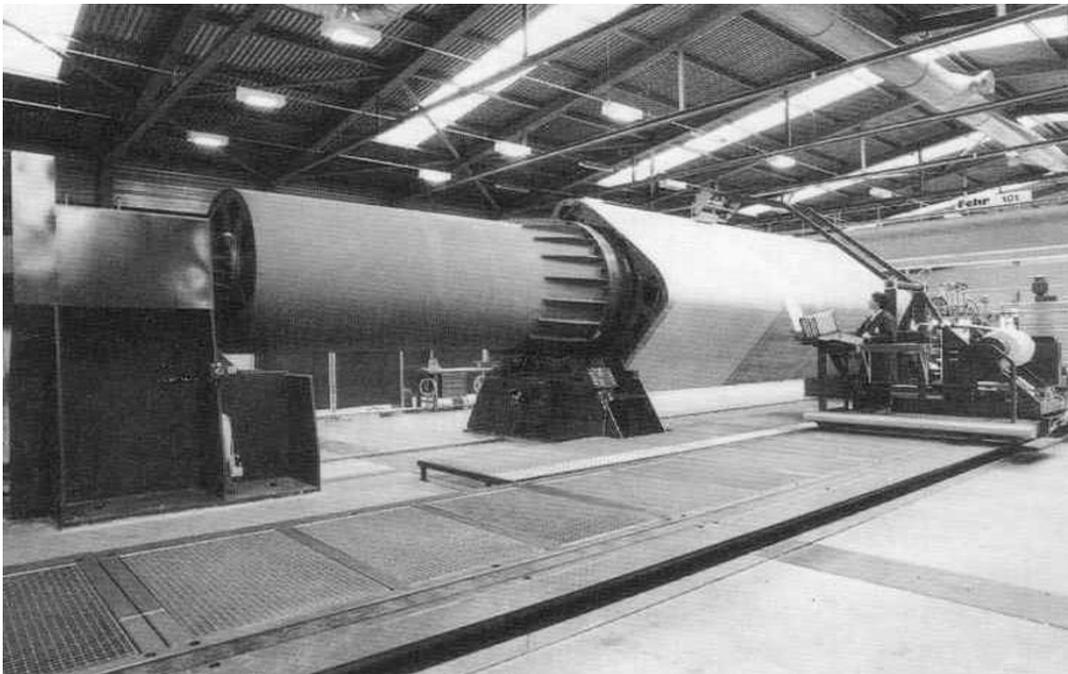
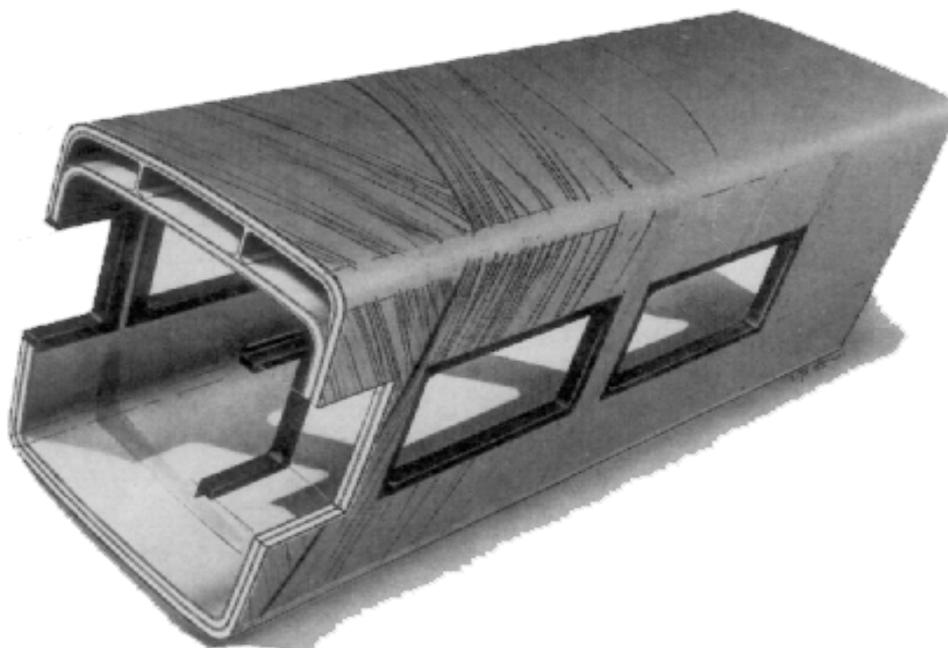


Bild 17 Wickeln eines Wagenkastens aus FVK [AND96]

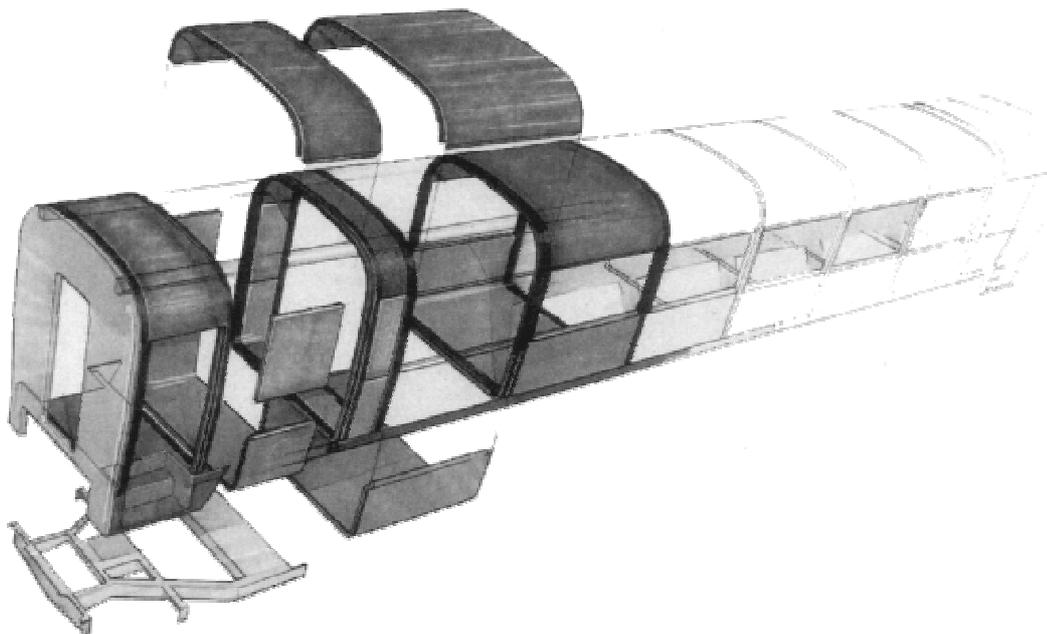
Die Wagenkästen werden als rechteckartige, abgerundete Röhre in einem einzigen Prozess integral hergestellt. Dach, Decke, Seitenwände und Boden werden gleichzeitig produziert [AND96]. Die Öffnungen für Türen und Fenster müssen nachträglich aus der rechteckartigen Röhre mit Trennverfahren entfernt werden, wodurch ein hoher Nacharbeitsanteil entsteht und eine wenig effiziente Materialnutzung erfolgt. Obwohl diese Technologie große Potentiale hinsichtlich einer Gewichtsoptimierung, der Reduzierung von Montageprozessen sowie einer technologischen Weiterentwick-

lung des Wagenkastens besitzt, ist sie bisher über den Status der Herstellung einiger Prototypen, Versuchswagen und Kleinserien wenig hinausgekommen.



**Bild 18** Wagenkastenrohling in FVK-Wickeltechnik [Schindler AG, AND95]

Weitere innovative Bauweisen werden unter dem Namen „Schalenbauweisen“ zusammengefasst. Hierbei übernehmen die Verschalungskomponenten aus FVK-Sandwichwerkstoffen eine wesentliche tragende Funktion. In die Struktur integrierte Aluminium- oder Stahlträger dienen der Krafteinleitung, der Montageunterstützung und der Verstärkung. Für die Herstellung von FVK-Sandwichstrukturen kommen verschiedene Verfahren in Frage, die sich nach Anwendung und zu fertigender Stückzahl des Bauteils richten. Die gängigsten Verfahren sind hier die Heißform- und Pressentechnik. Derartige FVK-Sandwichwerkstoffe finden im Flugzeugbau eine verbreitete Anwendung. Die Größe der Sandwich-Bauteile bestimmt dabei maßgebend die Formkosten. Bei kleineren Stückzahlen ist es darum im allgemeinen vorteilhaft, eine Großstruktur in mehrere identische Bausteine aufzugliedern und den Wagenkasten damit zu segmentieren (Bild 19). Durch diese Aufteilung können die Werkzeugkostenanteile begrenzt und Fahrzeugkonzepte in gewissen Grenzen variiert werden.



**Bild 19** Wagenkasten in Schalenbauweise mit Sandwichelementen [AND95]

Eine kostenbasierten Gegenüberstellung bezogen auf Lohn- und Materialkosten der beschriebenen Bauweisen zeigt Bild 20. Deutlich werden hierbei die sinkenden Lohnkosten bei Großprofil- und Schalenbauweisen infolge des reduzierten Montageaufwandes im Vergleich zur Differentialbausweise. Der Anstieg der Lohnkosten bei der Stahlleichtbauweise gegenüber der konventionellen Stahldifferentialbausweise ist durch den höheren Aufwand der Fügeoperationen für hochlegierte Stahlprofile begründet, die eine schlechtere Schweißbarkeit besitzen und deswegen vielfach mittels Kaltfügetechniken, wie Kleben, Nieten, Bolzen, gefügt werden.

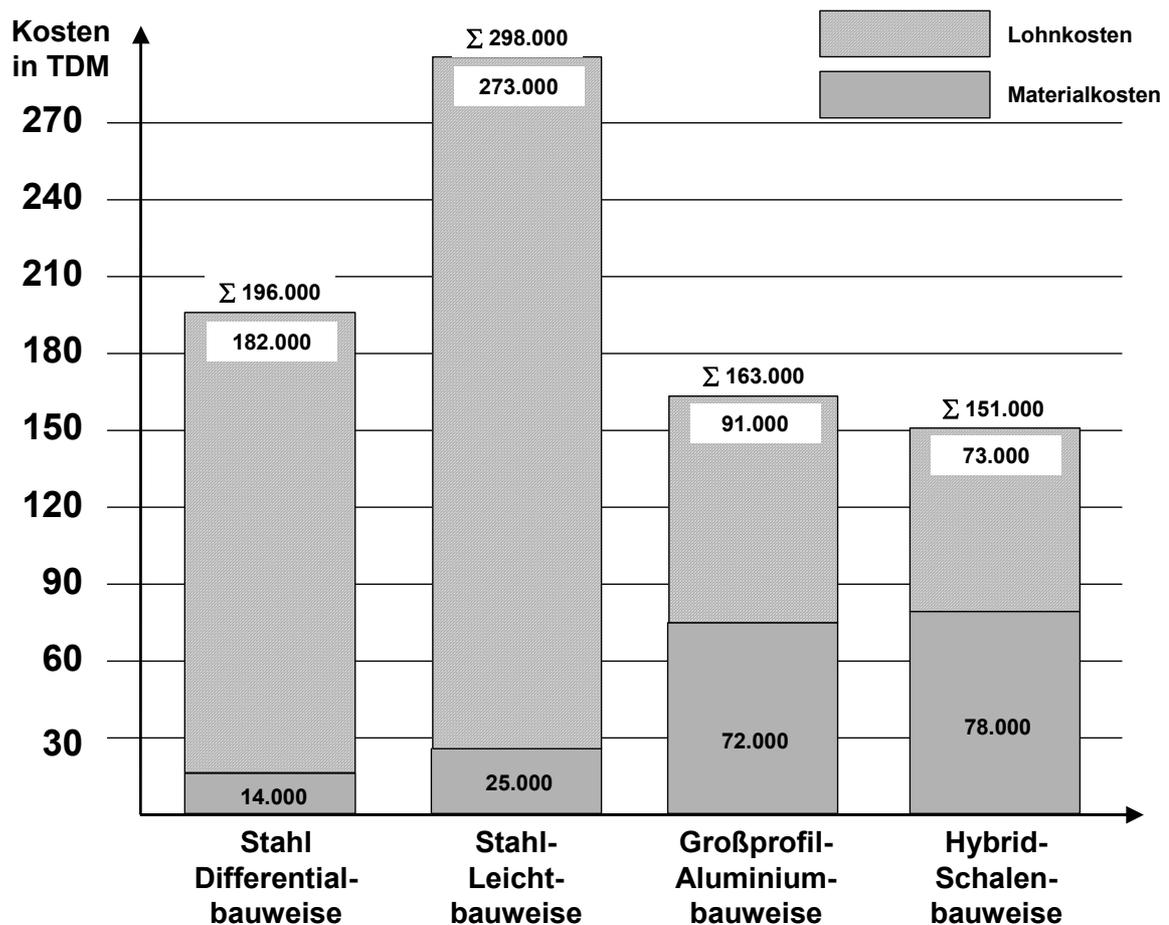


Bild 20 Bauweisen von Schienenfahrzeugen im Kostenvergleich [DIL00]

### 3.1.4 Modulare Bauweisen

Unter der Bezeichnung „modulare Bauweisen“ werden in jüngerer Zeit Wagenkastenbauformen zusammengefasst, die im Gegensatz zu konventionellen Bauweisen den Rohbau nicht mehr als einteilige, untrennbare Baugruppe darstellen. Vielmehr wird hier der Wagenkasten in mehrere Bereiche, die Wagenkastenmodule, unterteilt, wobei die räumliche Form des Wagenkastens erst später durch die Montage dieser Module entsteht [MER95]. Diese Bauweise bezieht sich nicht, wie die vorangegangenen Bauweisen, auf eine Fertigungsart, sondern beschreibt eine bestimmte Produktstruktur. Es wird daher je nach Art der Fertigung in Zusammenhang mit modularen Bauweisen auch von differential-modularen- bzw. integral-modularen Baukonzepten gesprochen. Von modularen Bauweisen wird im Schienenfahrzeugbau jedoch auch dann gesprochen, wenn eine Modulbildung auf Komponenten- oder Aggregatebene erfolgt. Welche Ausprägung der Modulbildung gewählt wird, hängt in erster Linie von der verfolgten Zielsetzung ab. So ist die Motivation zur Bildung modularer Produktstrukturen für *Fernverkehrs- und Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge*

dularer Produktstrukturen für *Fernverkehrs- und Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge* in erster Linie durch eine vereinfachte und grenzüberschreitende Instandhaltung von Aggregaten begründet. Bei *Regional- und Nahverkehrsfahrzeugen* steht eine individuelle Konfigurierbarkeit der Fahrzeuge und eine leichte Anpassbarkeit an Betriebs- und Infrastrukturbedingungen aus Standardmodulen im Vordergrund. Bei Straßenbahnen stellt wiederum die geforderte leichte Reparaturfähigkeit der Fahrzeugstruktur durch den schnellen Austausch von kompletten Wagenkasten-Modulen eine Motivation zur Modulbildung in der Fahrzeugstruktur dar [SAX99]. Im folgenden wird aufgrund des Schwerpunktes dieser Arbeit ausschließlich auf modulare Bauweisen, die sich auf die Wagenkastenstruktur beziehen, eingegangen. Die generellen Formen und Eigenschaften einer Modularisierung werden in Kapitel 5.1 noch vertiefend behandelt.

Bei heutigen Ausprägungen einer Modularisierung im Wagenkastenbau kommt es meist entweder zu einer Längs-, Quer- oder zu einer Kombinationsteilung des Wagenkastens. Bei geeigneter Modulteilung kann eine Vormontage der Innenausstattung der Wagenkastenmodule erfolgen. Dies beinhaltet zum Teil eine Aufhebung der fertigungstechnischen Trennung Rohbau / Innenausbau. Der eigentliche Wagenkasten entsteht durch eine möglichst späte Konfiguration der vormontierten Wagenkastenmodule (Bild 21).

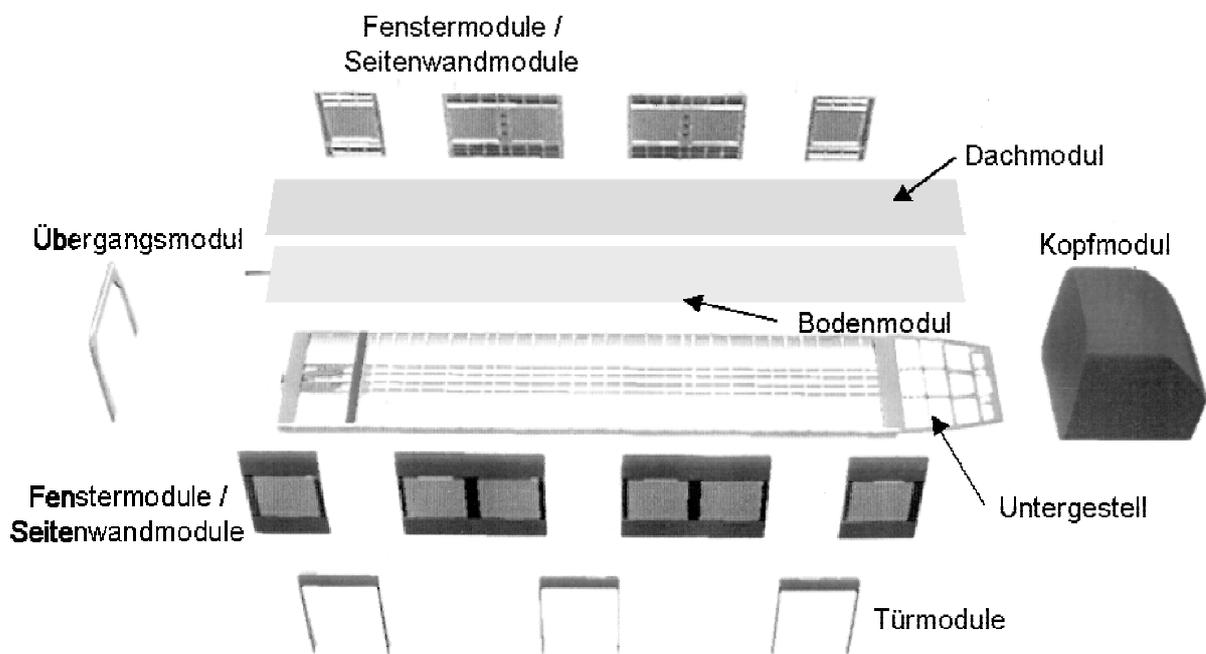


Bild 21 Modulares Wagenkastenkonzept [Bombardier Transportation, ALT99]

Eine Längsteilung erfolgt beispielsweise in die Module Untergestell, Seitenwände, Fahrzeugdach und Fahrzeugenden (Bild 21). Jedoch existieren auch andere Formen der Bildung der Wagenkastenmodule.

Bei einer Querteilung des Wagenkastens können Module für bestimmte Funktionsbereiche in entsprechenden Längen gebildet werden. Die Abgrenzung der Funktionsbereiche kann beispielsweise über die Fahrzeugenden, Tür- oder Fensterbereiche, fahrwerks- bzw. antriebstechnische Bereiche oder die Ausstattung des Fahrzeuginnenraums erfolgen (Bild 22).

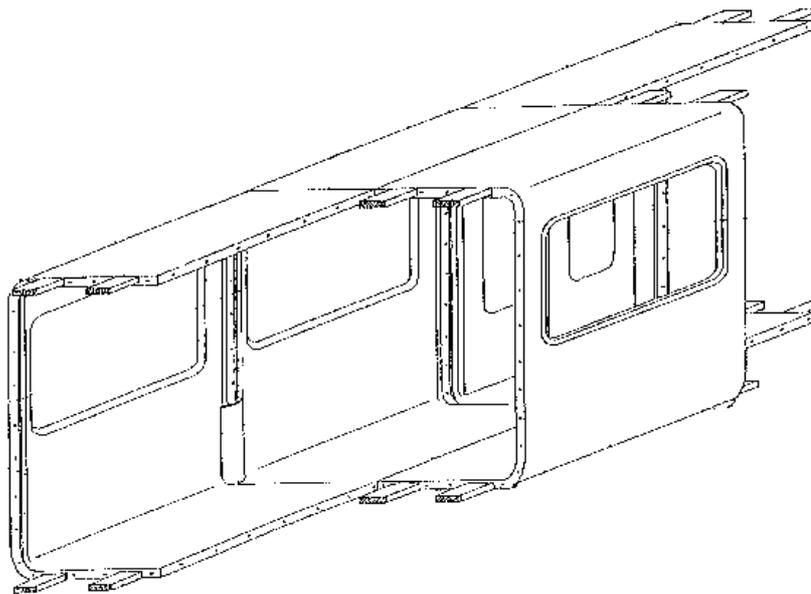
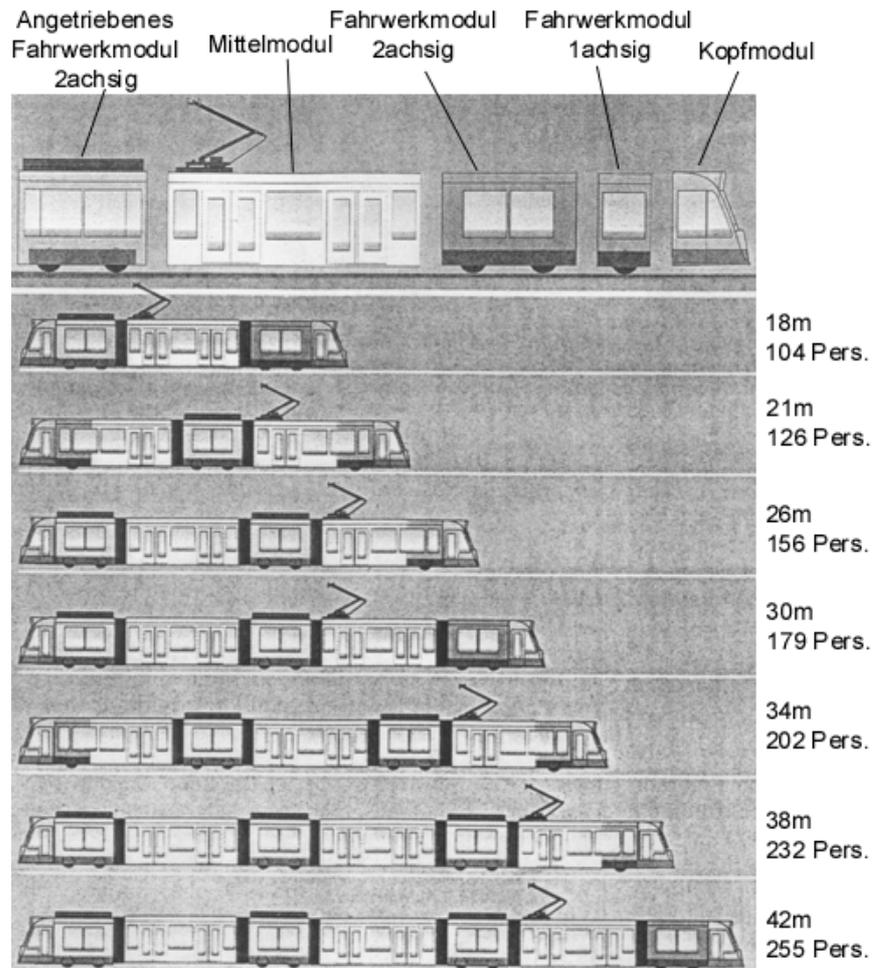


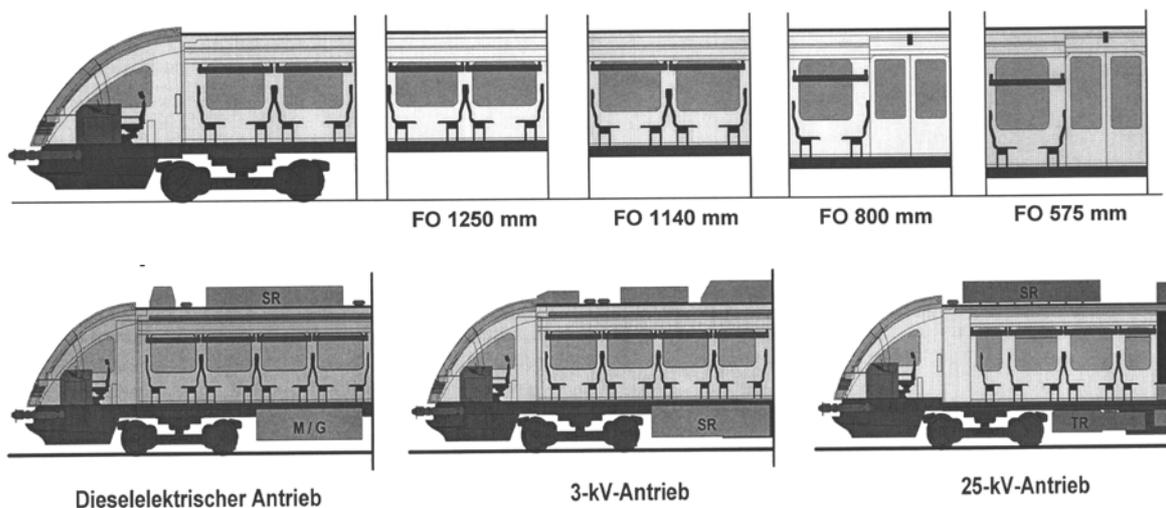
Bild 22 Modulare Querteilung eines Wagenkastens [DUE97]

Beim einem im Stadtbahnbereich umgesetzten Konzept besteht der gesamte Zug aus fünf unterschiedlichen, standardisierten Modulen, die durch eine Querteilung der Wagenkastenstruktur entstanden sind. Die Querteilung wurde hierbei nach fahrwerks- und antriebstechnischen Aspekten vorgenommen. Es wurden angetriebene und mitlaufende ein- oder zweiachsige Fahrwerkmodule sowie fahrwerklose Mittel- und Kopfmodule gebildet. Durch die Kombination der verschiedenen Module lassen sich flexibel Wagenkästen und gesamte Züge unterschiedlicher Länge von 18 m bis 42 m bilden, die je nach Ausführung 104 bis 255 Personen befördern können. Bild 23 zeigt die verschiedenen Module sowie Züge unterschiedlicher Länge durch die Kombinationen dieser Module.



**Bild 23** Modulbildung durch Querteilung der Wagenkästen und mögliche Wagenkasten- und Fahrzeugkonfigurationen [FEL97]

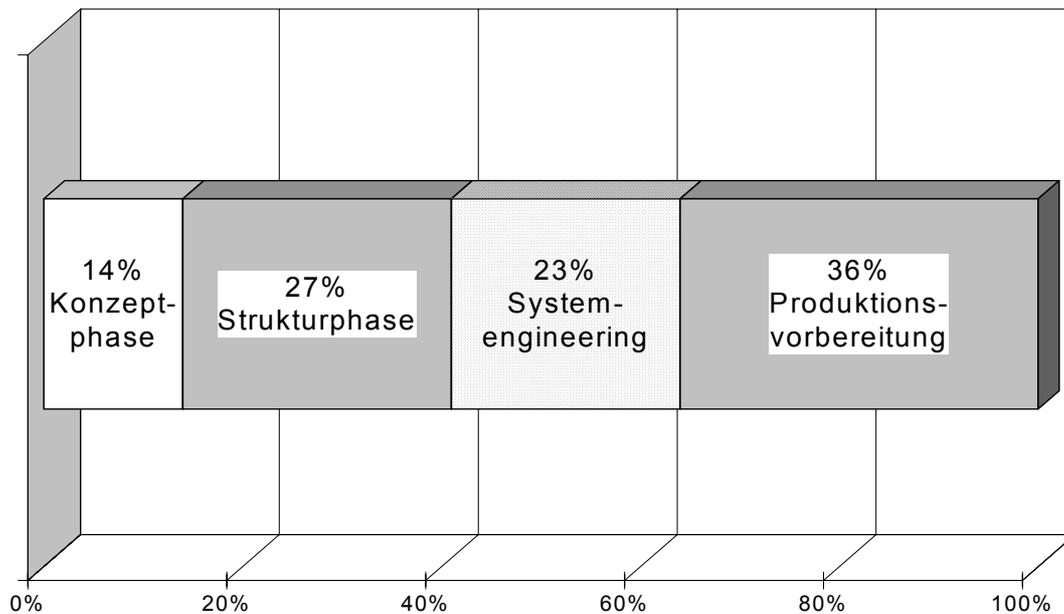
Ein vergleichbares Modularisierungskonzept wurde auch bei einem Regionalfahrzeug umgesetzt. Hier erlauben alternativ einzusetzende anbieterseitig festgelegte Wagenkastenmodule die Anpassung des Fahrzeugs an verschiedene definierte Infrastrukturrandbedingungen und Betriebsformen.



**Bild 24** Umgesetztes Modulkonzept eines Regionalfahrzeugs mit anbieterseitig definierter Variantenvielfalt [TRE00, MÖL00]

### 3.2 Entwicklungsablauf bei Schienenfahrzeugen

Die Betrachtung des Entwicklungsprozesses bei Schienenfahrzeugen verdeutlicht, dass insbesondere in einer frühen Produktentstehungsphase eine Standardisierung im Bereich der Fahrzeugstruktur zu erheblichen Einsparungen führen kann. Der Entwicklungsprozess für ein Schienenfahrzeug gliedert sich in verschiedene Entwicklungsphasen, die im allgemeinen als Konzeptphase, Strukturphase, System-Engineeringphase und Produktionsvorbereitungsphase bezeichnet werden. Die Grenze zur Arbeitsvorbereitung ist dabei fließend. Die Verteilung der einzelnen Phasen auf den Entwicklungsprozess zeigt [Bild 25](#).

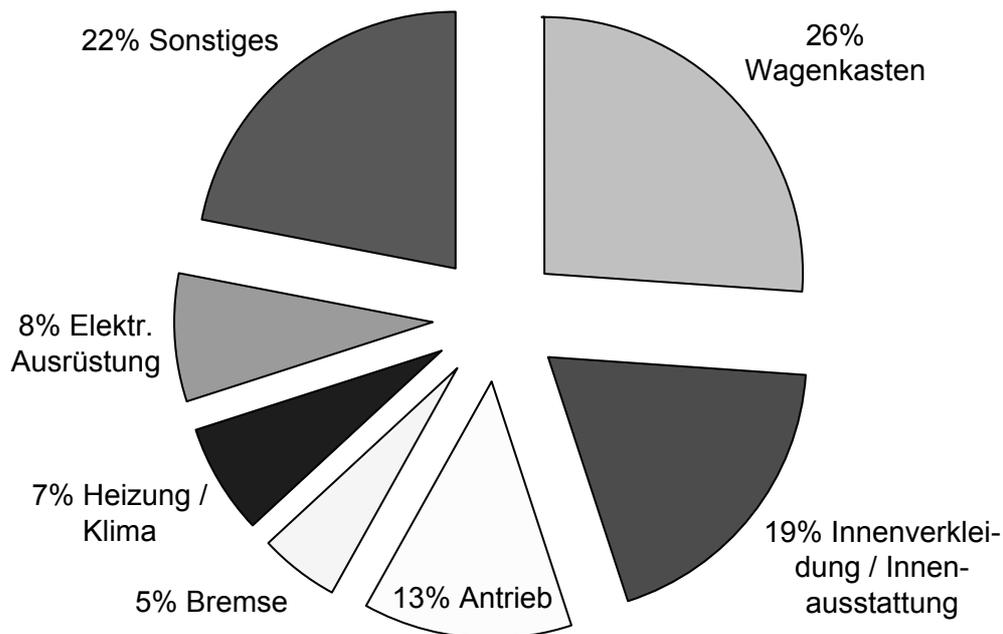


**Bild 25** Phasen des Entwicklungsprozesses bei Schienenfahrzeugen [Bombardier Transportation]

In der *Konzeptphase* werden in Anlehnung an *PAHL*, *BEITZ* die Geometrie, Topologie sowie wesentliche Wirkprinzipien des Fahrzeugs festgelegt [PAH97]. Weiterhin erfolgt in dieser Phase eine erste Spezifikation der Hauptsysteme, wie Klima-, Brems-, Fahrwerk-, Antriebs- und Türsystem, sowie erste Abschätzungen zu den Lebenszykluskosten des Fahrzeugs.

In der *Strukturphase* wird die Fahrzeugstruktur, d.h. der Wagenkasten einschließlich Untergestell, hinsichtlich geforderter statischer und dynamischer sowie ggf. auch Crash-Anforderungen ausgelegt. In der Phase des *Systemengineerings* werden sämtliche Fahrzeugsysteme (s. oben) detailliert definiert und ausgelegt. Die *Produktionsvorbereitungshase* bildet dann die Schnittstelle zur Arbeitsvorbereitung mit der Erstellung von Detailzeichnungen und Stücklisten sowie weiteren Produktdokumentationen.

Die Neukonstruktion eines kompletten Schienenfahrzeugs nimmt beispielsweise für ein vierteiliges, elektrisch angetriebenes Fahrzeug etwa 80.000 – 110.000 Stunden Entwicklungsarbeiten in Anspruch, wobei sich der Aufwand etwa wie in Bild 26 dargestellt verteilt.



**Bild 26** Aufteilung der Entwicklungsaufwände bei einem Schienenfahrzeug<sup>1</sup>  
[Bombardier Transportation, eigene Erhebung].

Aus der obigen Darstellung wird deutlich, dass eine Reduzierung des Entwicklungsaufwandes im Bereich der Wagenkastenstruktur und des Innenausbaus zu einer deutlichen Reduzierung des Gesamtentwicklungsaufwandes für ein Schienenfahrzeug führt. Aus diesem Grund behandelt diese Arbeit im Schwerpunkt den Wagenkasten.

### 3.3 Fertigung von Schienenfahrzeugen

Der Schienenfahrzeugbau ist in erster Linie durch eine manufakturartige Kleinserienfertigung geprägt. Typische Losgrößen von 1- 20 Fahrzeugen pro Auftrag, zahlreiche Nacharbeiten durch hohe Toleranzen und stark heterogene Produktspektren erlauben kaum eine Einführung von in der Automobilproduktion üblichen Fertigungsstrassen sowie den Einsatz von verstetigten, fließbandartigen Prozessen. Die erforderliche Fertigstellung der Fahrzeuge zum nächsten Fahrplanwechsel stellt dabei eine zusätzliche Herausforderung für alle in den Entwicklungsprozess eingebundene Partner dar.

---

<sup>1</sup> Unter „Sonstiges“ werden in der Grafik Tätigkeiten der Fahrzeugisolation, des Anstrichs, sowie Vorbereitungs- und Anpassungsarbeiten zusammengefasst.

Die Fertigungs- und Organisationsformen in der Schienenfahrzeugproduktion veränderten sich entsprechend der Entwicklung und dem Aufbau von Schienenfahrzeugen in den letzten 80 Jahren nur unwesentlich. Die Einführung der Aluminium-Großprofilbauweise ermöglichte zwar die Reduzierung der Anzahl von Arbeitsschritten, der grundsätzliche Ablauf der Fertigung blieb jedoch nahezu unverändert.

Die Produktion eines Schienenfahrzeugs vollzieht sich in verschiedenen Organisationsetappen, die sich über die Produktentstehungsphasen verteilen. So erstreckt sich die Fertigung über die

- Einzelteilfertigung,
- Baugruppenmontage,
- Rohbaufertigung,
- Nacharbeiten und Farbgebung sowie
- Ausbau bzw. Endmontage.

Die Fertigung von Schienenfahrzeugen erfolgt dabei vorwiegend arbeitsteilig und orientiert sich an der Bauweise des Wagenkastens. Die traditionelle Differentialbauweise des Wagenkastens führt in den Fertigungsbereichen weitgehend zu einer Baustellen- und Werkstattfertigung, in moderneren Betrieben und bei größeren Losgrößen ab 50 Stück auch zu einer getakteten Fließfertigung, wie sie im Großanlagen- und Flugzeugbau Anwendung findet [KET84].

Mit über 70 % bilden die Montagearbeitsgänge den Großteil der Fertigungszeit. Die Montagetätigkeiten verteilen sich bei konventioneller Fertigung im einzelnen auf folgende Arbeiten (Bild 27).

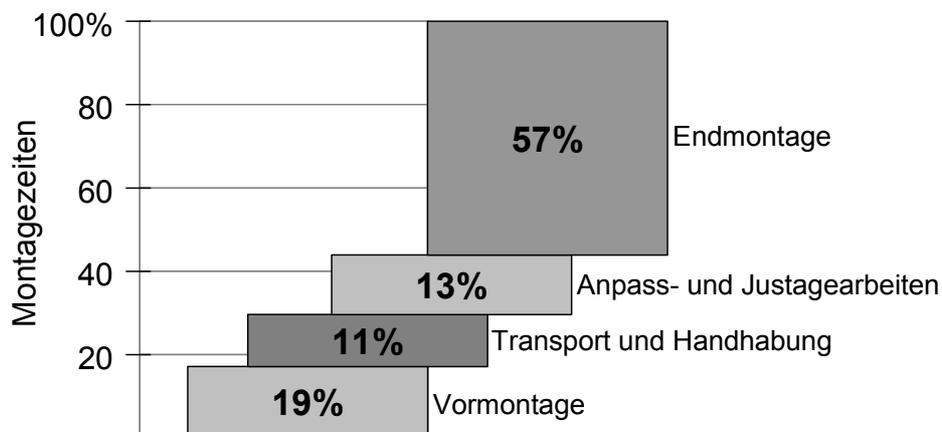


Bild 27 Zusammensetzung der Montagetätigkeiten bei der konventionellen Reisezugwagenfertigung [RUD92]

Bei modernen Konstruktionen und Fertigungskonzepten vergrößert sich der Anteil der Vormontage und die Tätigkeiten durch Anpassarbeiten und in der Endmontage reduzieren sich .

Rationalisierungsansätze in der Schienenfahrzeugfertigung zielen demnach primär auf eine Optimierung und Reduzierung der Montageprozesse ab. Geprägt ist die Fertigung und Montage durch eine Vielzahl von erzeugnisspezifischen Vorrichtungen, die einen hohen Fixkostenanteil bewirken. Insbesondere beim Einsatz der Integralbauweise ist eine stark erzeugnisorientierte Ausrichtung vorzufinden, d.h. Montageorganisationsform, Montagevorrichtungen und Montagestruktur sind erzeugnisdifferenziert ausgeprägt.

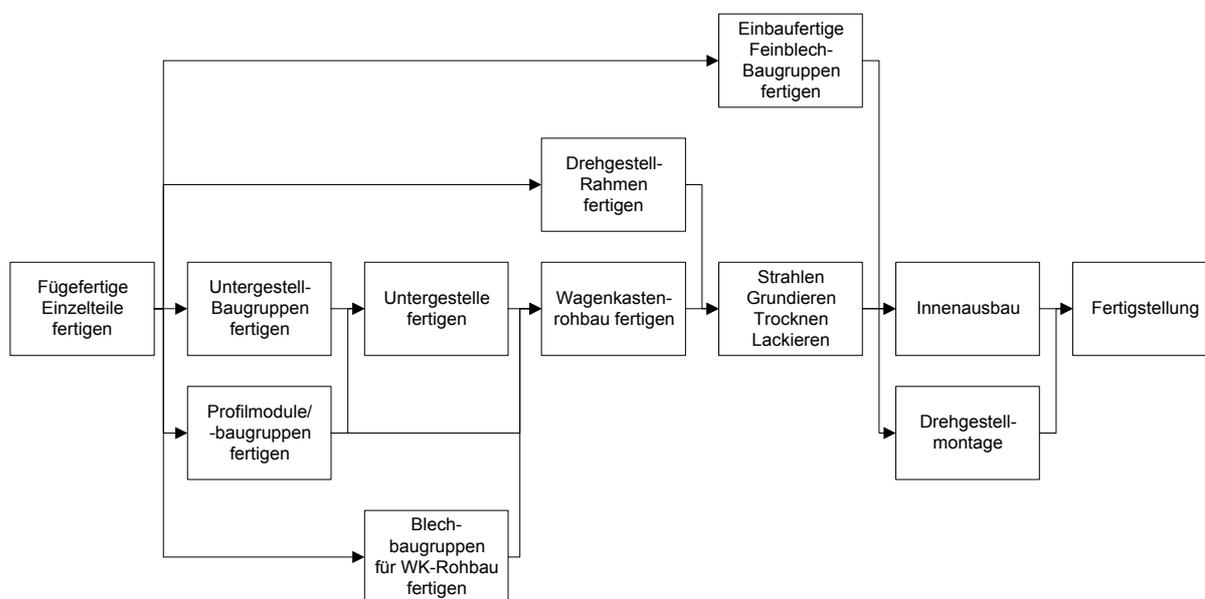
Im Vergleich zur Fertigung und Montage im allgemeinen Maschinenbau oder zur PKW-Produktion ist die Herstellung von Schienenfahrzeugen durch folgende spezifische Merkmale gekennzeichnet:

- hoher manueller Fertigungs- und Montageumfang sowie ausgeprägte organisatorische Komplexität der Produkte; ein Schienenfahrzeug weist ca. 20.000 zu montierende Teile auf, der Montageaufwand für einen vierteiligen Regionaltriebwagen beträgt etwa 280 Tage bei einer Durchlaufzeit von ca. 120-150 Tagen [Siemens, Bombardier Transportation];
- geringer Automatisierungsgrad sowie geringes technisches Niveau in der Montage; überwiegend manuelle Verrichtungen, hoher Vorbereitungs-, Anpassungs- und Nacharbeitsaufwand, wenig mehrfach referenzierbare und damit automatisierbare Tätigkeiten;
- komplexe Montageablaufstrukturen, d.h. stark sequentielle Vorranggraphenbeziehungen und hoher Grad an zeitlicher Vernetzung der Montagevorgänge;
- Vermischung verschiedener Fertigungsorganisationsformen (stationäre und gleitende Fließmontage);
- hoher Grad der Arbeitsteilung sowie hohe Taktzeiten.

Insbesondere die Planung der Endmontage als der den Fertigungsprozessen nachgeschalteten Stufe unterliegt einer erhöhten Komplexität. Erhebliche Toleranzen in der Rohbaufertigung, die gekoppelt sind mit stochastischen Störungen aus den verschiedenen vorangegangenen Prozessstufen, erfordern in hohem Maße eine Anpassung der Montageprozesse und der Ausbaukomponenten. Dies steht einer Verstetigung und Automatisierung der Arbeiten erheblich entgegen.

Weiterhin erschwert wird der Herstellungsprozess von Schienenfahrzeugen durch Mängel in der technischen und organisatorischen Vorbereitung. Aufgrund der späten, erst Ende der 80er Jahre begonnenen Einführung von modernen Informationssystemen im Schienenfahrzeugbau, wie CAE und PPS-Systemen sowie CAD/CAM-Kopplungen, und der mangelhaften Durchdringung der komplexen Erzeugnisstruktur sind die Fertigungsprozesse durch eine hohe Intransparenz und mangelhafte Planungsabläufe geprägt. Dies führt vielfach zu fehlender oder falscher Kapazitätsplanung sowie zu Mängeln in der Logistik [RUD92, ALT92, ALT99].

Die wesentlichen Verrichtungen oder Kernprozessstufen, die bei einer Schienenfahrzeugfertigung ausgeführt werden, sowie deren technologisch bedingte Ausführungsreihenfolge sind in Bild 28 in Form eines Vorranggraphen dargestellt. Die Darstellung bezieht sich auf eine Differentialbauweise, kann jedoch vom Ablauf nahezu unverändert auch für eine Integralbauweise übernommen werden.



**Bild 28** Vorranggraph der Kernprozessstufen in der Wagenkastenfertigung [MER94]

Der Fertigungsprozess beginnt mit der Herstellung bzw. der Beschaffung der fügefertigen Einzelteile, wie beispielsweise abgelängter und umgeformter Profile. Unter Verwendung dieser Einzelteile kann durch die Fertigung und das Fügen von Baugruppen die eigentliche Herstellung des Wagenkastens begonnen werden. Zur Herstellung des Untergestells werden die einzelnen Untergestellbaugruppen und die notwendigen Profilbaugruppen gefertigt. Zusammen mit den Blechbaugruppen und Profilen für die Wände und das Dach werden die Untergestelle zum Wagenkasten-

rohbau gefügt. In Abhängigkeit von der Bauweise des Wagenkastens handelt es sich hierbei entweder um die Herstellung des Gerippes und der Beplankung oder um die Herstellung der Strangpressprofile.

Der parallel dazu gefertigte Drehgestellrahmen wird im Anschluss zusammen mit dem Wagenkastenrohbau gestrahlt, grundiert und lackiert. In diesem Arbeitsschritt muss ebenfalls der durch das Schweißen verursachte Verzug des Wagenkastenrohbaus korrigiert werden. Dies erfolgt in der Regel durch manuelles oder mechanisiertes Richten, Spachteln und Schleifen.

Zum Abschluss erfolgt der Innenausbau des Wagenkastenrohbaus. Der Innenausbau ist durch komplexe und zeitintensive Verrichtungen geprägt. Im beengten Wagenkasteninneren werden dazu u.a. Kabel und Rohre verlegt, die Isolation der Außenwände angebracht und die Innenverkleidungselemente der Wände und des Dachs montiert. Vielfach werden zusätzliche Aggregate, wie Toiletten, Klimaanlage, Türantriebe und pneumatische Komponenten in den Waggon integriert. Zusätzlich ist der Boden zu verlegen sowie Bestuhlung und Tische zu befestigen. Aufgrund der Verschiedenartigkeit der Materialien und Elemente, die beim Ausbau des Innenraums verwendet werden, sind unterschiedliche Montageoperationen erforderlich. Hierzu werden speziell ausgebildete Werker wie Tischler, Rohrschlosser und Elektriker eingesetzt.

### **3.4 Ableiten der Defizite**

#### **3.4.1 Produktstruktur**

Durch die aus der Konstruktion festgelegte Bauweise des einteiligen, ganzgeschweißten Wagenkastens besitzt der Wagen bereits in einer frühen Phase seines Fertigungsablaufs die Form eines geschlossenen Zylinders mit wenigen Öffnungen [ALT92, ALT99]. Arbeiten des Innenausbaus und der Endmontage werden im nahezu geschlossenen Wagenkasten durchgeführt. Die Zugänglichkeit und die Bewegungsfreiheit werden dabei mit laufendem Ausbaufortschritt eingeschränkt. In der Regel verbleiben nur die Öffnungen für Türen und Fenster sowie die stirnseitigen Öffnungen. Innenausstattungs-elemente müssen durch diese Öffnungen ins Wageninnere befördert werden. Großvolumige oder großflächige Einzelteile, wie komplette Verkleidungselemente der Seitenwände bzw. des Daches sowie vorgefertigte Baugruppen, können aufgrund des begrenzten Öffnungsquerschnitts nur schwer eingesetzt werden, da der Transport ins Wageninnere nicht möglich ist oder nicht ohne Beschädigungen vollzogen werden kann. Weiterhin führen die großen Toleranzen

des Wagenkastenrohbaus, die primär durch den schweißwärmebedingten Verzug entstehen und im cm-Bereich liegen können, zu aufwendigen Anpassungsarbeiten der Innenausbaukomponenten.

So ist die auftragsunabhängige Bildung von kompletten Funktionseinheiten, wie großflächigen Verkleidungselementen oder Nasszellen für das WC, die vor dem Bau des Wagenkastens vormontiert und geprüft werden, bei konventionellen Produktstrukturen nur eingeschränkt umzusetzen. Hierdurch ergeben sich große Auswirkungen auf den Ablauf der Produktentwicklung. Mit der Auslegung der Innenausstattung kann erst begonnen werden, wenn das Layout des Wagenkastens vollständig konstruiert ist. Die Montage dieser Komponenten erfolgt erst nach abgeschlossener Erstellung des Wagenkastens. Hierdurch werden für die Produktentwicklung große Potentiale zur Parallelisierung verschenkt. Zudem ist der Einsatz von Montagehilfen, wie z.B. Hebezeugen durch den geringen Öffnungsquerschnitt des Wagenkastens begrenzt. Werker, die den Innenausbau durchführen, können daher nur in geringem Umfang auf Montagewerkzeuge, meist nur auf kleinere, elektrische oder pneumatische Handwerkzeuge, zurückgreifen. Sie sind daher gezwungen, kraftintensive Arbeiten manuell durchzuführen, woraus zum Teil nicht ergonomische und stark physisch belastende Arbeiten resultieren. Aufgrund der frühzeitig erstellten Wagenkastenstruktur müssen Verrichtungen im Bodenbereich sitzend oder kniend, Arbeiten im Deckenbereich stehend und überkopf ausgeführt werden. Bild 29 zeigt Arbeiter bei Tätigkeiten zum Innenausbau eines Wagenkastens.



Bild 29 Unergonomischer und beengter Innenausbau eines Wagenkastens

Daneben wirkt sich die geschlossene Wagenkastenstruktur auch auf die Möglichkeit der parallelen Ausführung von Verrichtungen im Innenraum aus. Das begrenzte Raumangebot gestattet das gleichzeitige Arbeiten von nur wenigen Werkern im In-

nenraum. Durch die Verwendung von Montagehilfsmitteln wird der verfügbare Raum zusätzlich reduziert. Hier kommt der Planung der Ausführungsreihenfolge und der Einhaltung der geplanten Montagezeiten für die Optimierung des Montageablaufs besondere Bedeutung zu. Für die Bestimmung der Ausführungsreihenfolge ist die ausschließliche Betrachtung der technologisch determinierten Montagereihenfolge nicht ausreichend. Vielmehr müssen, insbesondere bei potentiell parallel ausführbaren Tätigkeiten, die Restriktionen des begrenzten Raumangebots berücksichtigt werden. Kommt es bei der Ausführung der Verrichtungen zu Verzögerungen, besteht aufgrund der räumlichen Gegebenheiten nur bedingt die Möglichkeit des Kapazitätsausgleichs. Nachfolgenden Verrichtungen können nicht oder nur teilweise ausgeführt werden, die Auslastung der Arbeiter ist damit eingeschränkt.

Zusätzlich wird durch die bestehende Wagenkastenstruktur die Flexibilität hinsichtlich der technologisch bestimmten Ausführungsreihenfolge der Montageverrichtungen eingeschränkt, da der Wagen bei fortschreitendem Montageablauf immer unzugänglicher für die Montagearbeiten der einzelnen Berufsgruppen wird. So ist vor dem Einbau der Bestuhlung und der Tische, die Montage der Verkleidungselemente für die Seitenwände und auch der gesamte Deckenbereich vollständig durchzuführen, da diese Bereiche nach dem Einbau der Bestuhlung nicht oder nur schlecht zugänglich sind. Hieraus ergeben sich Einschränkungen hinsichtlich des flexiblen Einsatzes der Werker unterschiedlicher Berufsgruppen.

Neben den Schwachstellen, die sich für den Innenausbau aus der fertigungsbedingten Produktstruktur in Form des geschlossenen Wagenkastens ergeben, stellt sich der Transport des Wagenkastens aufgrund des großen Volumens und der Masse als schwierig dar. So erfordert der Transport eines Wagenkastens aufgrund seiner Dimension und seines Gewichts spezielle und investitionsintensive Transportmittel. Weiterhin müssen dabei sicherheitstechnische Anforderungen erfüllt werden, die bei einem derartigen Transport oftmals viele Fertigungsbereiche betreffen. Werker aus anderen Bereichen müssen daher ihre Arbeit aus Rücksicht auf derartige Transporte unterbrechen.

Hinsichtlich der Bildung von anbieterseitigen oder kundenspezifischen Geometrievarianten bietet der einteilige Wagenkasten mit fixer Verrichtungsstruktur in der Fertigung kaum Möglichkeiten für eine schnelle und wirtschaftliche Umsetzung. Geforderte Geometrieänderungen führen stets zu einer erforderlichen Anpassung der Betriebsmittel sowie vielfach der kompletten Fahrzeugstruktur einschließlich des Innenausbaus mit entsprechenden Entwicklungsaufwendungen. Bei der Integralbauweise werden für nahezu jede kundenspezifische Formänderung entsprechende

kostenintensive Strangpresswerkzeuge benötigt. Durch die produktstrukturbedingt erforderliche serielle Fertigung von Wagenkasten und Innenausbau und die ausgeprägten Wechselwirkungen und Anpassungsarbeiten kann kaum eine Parallelisierung der Montage in diesen Bereichen erfolgen. Eine auftragsentkoppelte Entwicklung und Fertigung von Wagenkastenbereichen, die eine baukastenartige, anbieterseitig vorgesehene schnelle Variantenbildung ermöglicht, ist ebenfalls aus diesen Gründen kaum möglich.

### 3.4.2 Fertigungsprozesse

Seit den 30er Jahren ist Schweißen das vorherrschende Fertigungsverfahren zur Herstellung des Wagenkastenrohbaus. Auch der Einsatz von Leichtmetallen wie Aluminium setzte sich erst durch die Beherrschung des Prozesses Aluminiumschweißen durch. Aufgrund der hohen Steifigkeitsanforderungen und der großen betriebsbedingten dynamischen Belastungen, die auf den Wagenkasten wirken, werden die Bauteile für den Wagenkastenrohbau in der Regel durch Lichtbogenschweißen in langen, durchgängigen Nähten miteinander verbunden. Das produktivere Punktschweißen, wie es in der Automobilindustrie verbreitet ist, kommt aufgrund der hohen Betriebs- und Prüfbelastungen nur sehr eingeschränkt in weniger belasteten Bereichen, zum Beispiel im Dach, zum Einsatz. Der verbreitete Einsatz des Schweißens ist als erhebliche Prozessschwachstelle zu sehen. Die hohe Wärmezufuhr beim Lichtbogenschweißen langer Nähte führt zu Schweißverzug sowie zu Formänderungen der Fügepartner und schränkt eine Montage von Strukturbaugruppen ohne erhebliche Anpass- oder Nacharbeiten ein [EVE96b]. Insbesondere durch das kleine Verhältnis von Wandstärke zur Fläche der Bauteile im Wagenkastenrohbau verziehen sich die Bauteile beim Schweißen wagenlanger Nähte erheblich. Der entstehende Verzug muss manuell durch Richtpunkten, großflächiges Schleifen und Spachteln korrigiert werden. Jedoch kann der Verzug oft nur hinsichtlich des äußeren Erscheinungsbildes des Fahrzeugs vollständig ausgeglichen werden, deutliche Maßabweichungen des Rohbaus bis zu einigen Zentimetern bleiben dennoch bestehen. Diese Maßabweichungen wirken sich dabei auf die Passgenauigkeit der Elemente für den Innenausbau aus. Innenausstattungs-elemente müssen hinsichtlich der Genauigkeitsanforderungen für die Montage flexibel ausgelegt sein, um auch bei größeren Toleranzen des Wagenkastens montierbar zu sein. Hierbei sind vielfach manuelle Anpassungen an die gegebene Wagenkastenstruktur erforderlich, was zu erheblichem Mehraufwand für den Einbau der Innenausstattung führen kann und einer Vormontage und Vorkonfektionierung der Innenausbaukomponenten entgegen steht.

Zum Teil erfordern diese maßtoleranzbedingten Anpassungsarbeiten einen Anteil von bis zu 10% bei der Innenausbaumontage [RUD92].

Die entstehende Schweißwärme beeinflusst über die Maßungenaugigkeit des Wagenkastens hinaus die Flexibilität der Montagereihenfolge erheblich. Mit der Verarbeitung von hitzeempfindlichen Werkstoffen im räumlichen Umfeld des Wagenkastens kann erst nach dem vollständigen Abschluss aller Schweißarbeiten am Rohbau begonnen werden. Neben der reduzierten Flexibilität der Montagereihenfolge wird zusätzlich die mögliche Parallelisierung von Prozessen eingeschränkt. Die Montage von Seiten- oder Deckenverkleidungen, Fenstern, der Bestuhlung sowie des Fußbodenbelags ist vor oder während der Schweißvorgänge nicht möglich. Dadurch werden wertvolle Rationalisierungspotentiale verschenkt, die durch mögliche Änderungen der Montagereihenfolge und eine Parallelisierung von Verrichtungen realisiert werden könnten. Mit der Fortentwicklung von modernen Kaltfügeverfahren zur Verbindung schwerer, hochdynamisch belasteter Baugruppen, wie Schwerlastnietverfahren, können heute zunehmend vormontierte Wagenkastensegmente miteinander verbunden werden. Einem großflächigen Einsatz und der Substitution des Schweißens durch derartige Kaltfügetechniken stehen jedoch derzeit noch hohe Fertigungstoleranzen sowie Bedenken der Betreiber hinsichtlich Dauerfestigkeit und Kostenersparnis gegenüber.

Der Fertigungsprozess des Strangpressens, zur Erstellung großflächiger Bauteile für den Wagenkastenrohbau, steht einer wirtschaftlichen Variantenbildung im Rohbau wesentlich entgegen. Strangpressprofile werden in der Regel von externen Zulieferern bezogen, da einerseits die Beschaffung der Pressen sowie der Strangpresswerkzeuge investitionsintensiv ist und andererseits die Fertigung von Großstrangpressprofilen umfangreiche und spezialisierte Kenntnisse erfordert. Wird die Wagenkastenstruktur neu entwickelt oder geändert, müssen die zur Herstellung der Profile notwendigen Werkzeuge für das Strangpressen angepasst oder neu entwickelt und hergestellt werden. Bei Neukonstruktionen fallen typischerweise Werkzeugkosten von mehreren hunderttausend Euro an [HER92]. Hinzu kommen die Kosten für die Entwicklung des Profils in Zusammenarbeit mit dem Halbzeughersteller. Der produktspezifische Fixkostenanteil an Vorrichtungen und Werkzeugen für ein Fahrzeug erhöht sich hierdurch erheblich. Weiterhin wird jedes Strangpresswerkzeug über die Herstellung der Profile hinaus aus Gründen der Ersatz- und Folgebeschaffung über die gesamte Lebensdauer des betreffenden Fahrzeugs, meist über 30 Jahre, aufbewahrt und gepflegt.

Kennzeichnend innerhalb der Prozesskette in der Schienenfahrzeugfertigung ist der zögerliche Einsatz innovativer Fertigungstechnologien, die eine flexiblere Prozessan-

passung ohne erhöhte Fixkosten ermöglichen. Als Beispiele sind an dieser Stelle moderne Laser- und Hydroumformtechnologien zu nennen. Mit Lasertechniken können heute softwaregestützt und damit hoch flexibel auftragsspezifische Leichtbaustrukturen mit hoher Wirtschaftlichkeit erstellt werden, wobei der Laser zum Trennen und Fügen eingesetzt werden kann. Aufgrund des lokal begrenzten Wärmeeintrags ist es mit dieser Technologie möglich, hochfeste, verzugsfreie und filigrane Leichtbaustrukturen reproduzierbar herzustellen, die eine hohe Maß-Passgenauigkeit aufweisen und damit die Konfiguration von auftragsunabhängig gefertigten Komponenten zu Großbaugruppen ermöglichen. Weitere bisher unberücksichtigte Potentiale bieten neue Umformtechnologien, die gezielt Verfestigungseffekte der Werkstoffe nutzen, wie z.B. das Hydro-Hochdruckumformen. Die Nutzung dieser Technologien in Kombination ermöglicht die Bearbeitung komplexer Scherbaugruppen für den Wagenkasten auf den gleichen Fertigungsanlagen ohne die bislang eingesetzten teuren Großvorrichtungen, woraus sich Möglichkeiten einer wirtschaftlichen Variantenbildung ergeben [ALT97, ALT99].

Bild 30 zeigt eine Zusammenfassung der beschriebenen Defizite.



Bild 30 Zusammenfassung der Defizite im Schienenfahrzeugbau

## 4 Entwicklungsszenarien und Ableiten des Handlungsbedarfs

Die in Kapiteln 3.1 bis 3.3 dargestellten Bauformen von Wagenkästen und die zugehörigen Fertigungsabläufe beinhalten unter Berücksichtigung der in Kapitel 2 aufgeführten aktuellen und zukünftigen Anforderungen an Schienenfahrzeuge erhebliche Schwachstellen. Insbesondere die Bildung von einsatzspezifischen Fahrzeugvarianten bei gleichzeitiger Erfüllung der anfangs beschriebenen Anforderungen für Schienenfahrzeuge bestehend aus *Kosten*, *Zeit* und *Qualität* (siehe Bild 3), erscheint bei stetig wachsenden Ansprüchen unter Beibehaltung der beschriebenen Produkt- und Organisationsstrukturen mittelfristig im Schienenfahrzeugbau nicht mehr hinreichend umsetzbar.

Neue, zusätzliche Anforderungen an Schienenfahrzeuge, wie eine stärkere Berücksichtigung von lokalen Wertschöpfungsprozessen für das Exportgeschäft und dezentralen Entwicklungs- und Fertigungsnetzwerken unter Einbeziehung von Partnern, die komplette Systeme und Strukturelemente entwickeln und herstellen unterstreichen den aktuellen Handlungsbedarf bei den Produkten und Prozessen des Schienenfahrzeugbaus.

Der Erfolg neuer Konzepte wird jedoch stark von der Entwicklung des Wettbewerbs der Bahnbetreiber untereinander sowie zwischen den Verkehrsträgern und den zukünftigen technischen und betrieblichen Rahmenbedingungen abhängen. So können einerseits aktuelle europäische Standardisierungsbestrebungen als auch die zunehmende Dezentralisierung des Betreibergeschäfts sowie die ausgeprägte Exportorientierung der Hersteller zu stark differierenden Lösungen führen [ZIJ00]. Da die vorherrschende Entwicklungsrichtung aus heutiger Sicht nicht eindeutig abgeschätzt werden kann, werden im Anschluss zwei mögliche Marktszenarien dargestellt und ihre Auswirkungen auf die Anforderungen an den Schienenfahrzeugbau analysiert.

### 4.1 Entwicklungsszenarien und Erwartungen

Der Markt des spurgebundenen Verkehrs befindet sich seit der Bahnreform und den zunehmenden Privatisierungsinitiativen in einer andauernden Veränderungsphase. Geprägt wird dieser Entwicklungsprozess zum einen durch einen steigenden Kostendruck auf den gesamten Bahnbetrieb und dabei insbesondere auf die Systemhäuser und Zulieferer. Zum anderen bedingt der zunehmende Wettbewerb eine stärkere Individualisierung infolge der ausgeprägten Orientierung an Kundenwünschen und internationalen technischen Randbedingungen. Hieraus ergibt sich einerseits die Forderung nach hoher Vereinheitlichung der Fahrzeuge zur Senkung der

variantenbedingten Kosten, andererseits wird ein zunehmender Spezifikationsgrad der Fahrzeuge in Abhängigkeit vom Einsatzfeld gefordert.

In Abhängigkeit davon, welche dieser beiden Szenarien zukünftig dominieren wird, werden einige der in Kapitel 2.2 aufgeführten Gründe und Folgen der Variantenvielfalt im Schienenfahrzeugbau verstärkt, andere abgeschwächt werden. Die Einflüsse zur Bestimmung dieser Entwicklung sind in hohem Maße durch verkehrs- und gesellschaftspolitische Aspekte geprägt und damit schwer prognostizierbar. Da die Entwicklung der Ausgangsbedingungen des Bahnverkehrs jedoch erhebliche Auswirkungen auf die Bauformen und Produktionsabläufe im Sinne einer erhöhten Standardisierung oder einer ansteigenden Individualisierung der Fahrzeuge besitzt, sollen im Anschluss mit Hilfe der Szenariotechnik mögliche Entwicklungen des schienengebundenen Verkehrs und daraus resultierende Folgen abgeschätzt werden.

Die Szenariotechnik stellt ein Instrument zur Ableitung von Handlungsmaßnahmen in Folge von möglichen Zukunftssituationen dar, die auf komplexen Einflussfaktoren beruhen. Szenarien können die Darstellung der zukünftigen Entwicklung enthalten, die aus Erkenntnissen der Gegenwart abgeleitet werden. Der Einsatz von Szenariotechniken setzte sich seit den 70er Jahren vor allem bei Unternehmen durch, die in einem instabilen politischen und sozialen Umfeld und einem turbulenten Markt operierten, und langfristige Entscheidungen treffen mussten [GAU96].

Es ist davon auszugehen, dass die Infrastruktur mittel- und langfristig aufgrund des damit verbundenen erheblichen Aufwands nicht an potenzielle Standardfahrzeuge angepasst wird, sondern vielmehr weiterhin die Fahrzeuge entsprechend der Infrastruktur adaptiert werden müssen. Daraus folgt, dass eine starre und weitreichende Standardisierung der Fahrzeuge aufgrund der starken infrastrukturellen und betriebsbedingten Unterschiede auch langfristig technisch nicht möglich ist, so dass eine entsprechende Mindest-Variantenvielfalt der Fahrzeuge weiter bestehen bleiben wird. Darüber hinaus können weitere, nachfolgend aufgeführte Aspekte zu einer Erhöhung der Variantenvielfalt bei Schienenfahrzeugen führen.

## **4.2 Vielfalterhöhende Entwicklungen: Szenario Spezifikationsdominanz**

### **4.2.1 Einsatzfelder und Antriebskonzepte**

Der Wunsch und die Notwendigkeit, traditionelle Einsatzgrenzen von Schienenfahrzeugen zu erweitern, erfordert neue, angepasste Fahrzeuge. So müssen Verkehrsbetriebe, um entsprechend auf dezentrale Stadtstrukturen zu reagieren, aus der Stadt in das Umland oder aus dem Umland in die Stadt hineinfahren. Dies führt mittelfristig zu einer Auflösung der Einteilung in anwendungsorientierte Fahrzeugtypen (vgl. S. 8).

Fahrzeuge mit übergreifenden Anwendungsgebieten müssen in Deutschland gegebenenfalls den Anforderungen zweier Betriebsordnungen (BOStrab und EBO) genügen, und weiterhin in der Antriebsart häufig mehrsystemfähig sein. Abhängig von den lokalen Voraussetzungen wird ein optimales Antriebssystem gesucht. Eingesetzt werden derzeit Dieselfahrzeuge (z.B. in Zwickau, Düren) und 2-Stromsystemfahrzeuge (z.B. in Karlsruhe, Saarbrücken). Untersucht werden weiterhin Kombi-Fahrzeuge mit Diesel- und Elektrotraktion (z.B. Duo-S-Bahn in Berlin und Kaiserslautern). Für die Zukunft ist mit den Fortschritten der Wasserstofftechnologie zu erwarten, dass Brennstoffzellen als Energielieferant gerade für Nischenanwendungen geeignet sein können. Bereits der Variantenreichtum der möglichen und für den jeweiligen Einsatzzweck vorteilhaften Antriebssysteme und die daraus resultierenden notwendigen Strukturanpassungen wirken einer möglichen Standardisierung der Fahrzeuge tendenziell entgegen.

### **4.2.2 Vielfalt und Wettbewerb von Verkehrsunternehmen**

Mit der Liberalisierung der Schienenverkehrsmärkte stieg und steigt die Anzahl der Anbieter von Verkehrsleistungen auf der Schiene. Daraus resultiert nicht zwingend eine höhere Vielfalt an Fahrzeugen, doch führen Marketing- und CI-Konzepte moderner Betreiber zu einem Bedarf an individueller und unterscheidbarer Gestaltung der Fahrzeuge. Unterschiedliche Streckentopologien und neue Betriebskonzepte, wie beispielsweise der Einsatz leistungsstarker Triebwagen für den Güterverkehr, verschiedene Instandhaltungsstrategien und Kostenkalkulationen, sowie die jeweilige durch den Betreiber vorgenommene streckenbezogene Einschätzung des von den Fahrgästen gewünschten und bezahlten Komfortniveaus der Fahrzeuge führen zu weiter divergierenden Anforderungen an die Fahrzeuge.

### 4.2.3 Einsatzspezifikation und betriebliche Randbedingungen

Der Wettbewerb der regionalen Bahnbetreiber untereinander und der Wettbewerb zu konkurrierenden Verkehrsträgern in der Region bedingt eine höchstmögliche Attraktivität der Schienenfahrzeuge und der Transportdienstleistung. Dies führt zu einer Bildung von Fahrzeugvarianten, die sich in der Ausstattung, dem Antriebskonzept, der Transportkapazität und –geschwindigkeit sowie dem gesamten Fahrzeugkonzept unterscheiden. Ein Beispiel für ein derartig einsatzspezifisches Fahrzeug ist der zwischen Köln und Hamburg verkehrende „METROPOLITAN“, der als im Wettbewerb zum Flugzeug stehender, sogenannter „Businesszug“ mit hohem Komfortniveau und hoher Transportleistung ausschließlich für diesen Einsatzzweck entwickelt und gefertigt wurde. Bei weiterhin steigendem intermodalen Wettbewerb der Verkehrsträger ist davon auszugehen, dass auch zukünftig für derartige, hochspezifische Schienenfahrzeuge als Wettbewerbsprodukt zum Luft- und PKW-Verkehr ein großer Markt besteht. Dies trägt zu einer weiteren Erhöhung der Variantenvielfalt im Schienenfahrzeugbau bei.

### 4.2.4 Local-content-Forderungen

Die Forderung nach der Beteiligung lokaler Unternehmen beim Import von Fahrzeugen führt zu höherer Vielfalt, wenn nicht nur das Zusammensetzen eines Bausatzes gewünscht ist, sondern auch höherwertige Konstruktionsleistungen oder komplette Baugruppen lokal entwickelt und bezogen werden müssen. Die Hersteller müssen daher Produktvarianten berücksichtigen, die eine Anpassung und Integration lokal gefertigter Komponenten oder Entwicklungen zulassen und berücksichtigen [ALT99]. Ein sorgfältiges Schnittstellenmanagement sowie offene und anpassbare Produktarchitekturen sind wesentliche Voraussetzungen für derartige verteilte Produktentstehungskonzepte und bewirken eine Erhöhung der Variantenvielfalt, die in ihrem Umfang und ihrer Ausprägung vom Hersteller vielfach nicht vorhersehbar ist.

## 4.3 Vielfaltreduzierende Entwicklungen: *Szenario Kostendominanz*

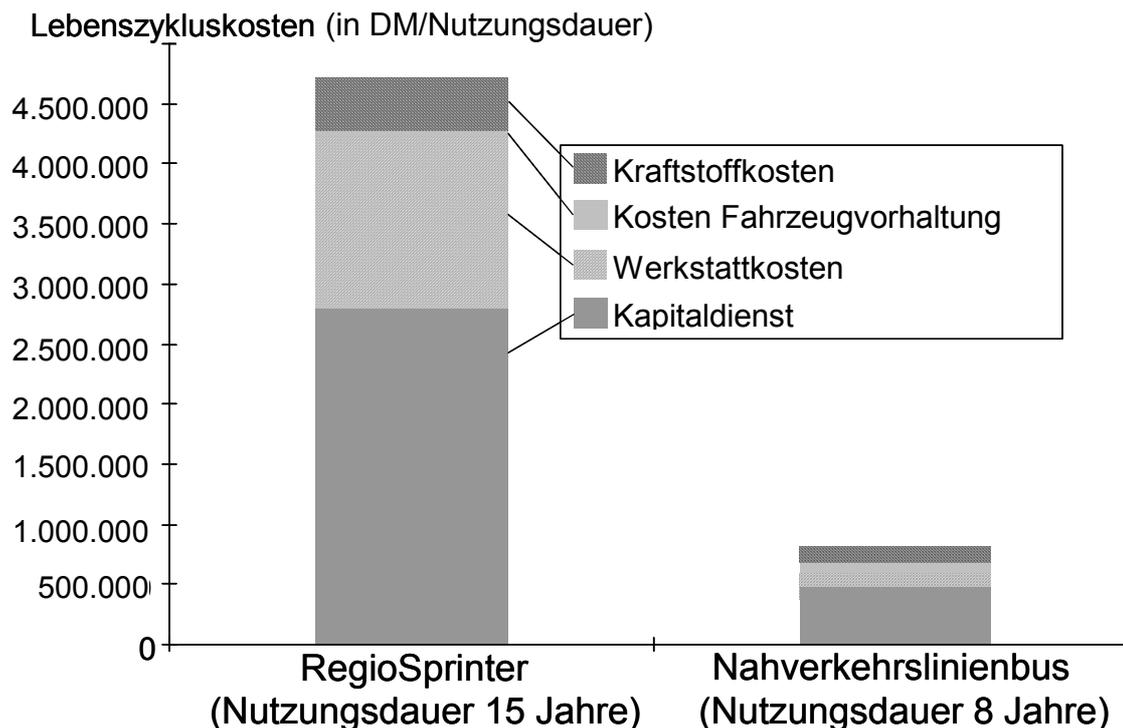
Neben den in Kapitel 4.2 beschriebenen Rahmenbedingungen, die zu einer zukünftigen Erhöhung der Variantenvielfalt führen können, existieren auch insbesondere in jüngster Zeit Tendenzen, die eine mittelfristige Reduzierung der Variantenvielfalt zur Folge haben können. Diese werden nachfolgend beschrieben.

#### 4.3.1 Wirtschaftliche Entwicklung der Verkehrsunternehmen

In Deutschland wurde im Jahre 1997 der Öffentliche Verkehr (Busse und Bahnen) mit 22 Mrd. DM subventioniert, der Kostendeckungsgrad der Betriebe des Öffentlichen Nahverkehrs schwankt dabei zwischen 10% und 80% [EWE99]. Diese Subventionen werden zunehmend reduziert, da einerseits Quersubventionen innerhalb von Stadtwerken aufgrund der Liberalisierung der Strommärkte entfallen und die Öffentliche Hand weiter nach Einsparmöglichkeiten sucht. Zugleich nimmt der Wettbewerb auf fast allen Ebenen des Öffentlichen Verkehrs durch Regionalisierung und Ausschreibungspflicht für nicht eigenwirtschaftliche Verkehre zu. Der daraus resultierende Kostendruck wird dabei an die Schienenfahrzeughersteller weitergegeben. Um diesem entstehenden Kostendruck zu entsprechen, müssen herstellerseitige Maßnahmen zur möglichen Reduzierung der Herstellkosten konsequent genutzt werden. Nach Aussagen der Hersteller bietet die Standardisierung von Komponenten, Baugruppen, Modulen, Systemen und ganzen Fahrzeugen erhebliche Potenziale zur Minderung der Komplexität in Konstruktion, Fertigung und Instandhaltung von Schienenfahrzeugen [GIE94, MEY99]. Ebenfalls in Zusammenhang mit einer angestrebten Kostenreduzierung ist der Abbau der technischen Abteilungen bei den Bahnbetreibern zu sehen. Aufgrund des damit verbundenen Verlustes von technischem Know-how erstellen Betreiber bei Neubeschaffungen zunehmend sog. funktionale Lastenhefte statt detaillierte "Konstruktionslastenhefte". Als unmittelbare Folge daraus sind die Hersteller freier in der Konstruktion und können standardisierte Fahrzeuge oder Fahrzeuge mit einem großen Anteil standardisierter Komponenten anbieten, wenn diese den funktionalen Vorgaben entsprechen.

#### 4.3.2 Kosten der Fahrzeuge

Einen großen Einfluss auf eine Standardisierung als Mittel zur Kostenreduzierung hat der anhaltende Preisdruck seitens der Bahnbetreiber. Hierbei werden zunehmend nicht nur die Anschaffungs-, sondern vielmehr die Lebenszykluskosten, im folgenden LCC, berücksichtigt, die als kumulierte Kosten eines Produktes über seinen Lebenszyklus definiert sind. Sie umfassen bei Schienenfahrzeugen neben den Beschaffungskosten auch die Betriebskosten, Kosten für präventive und korrektive Instandhaltung sowie die Entsorgungskosten. Den Handlungsbedarf, die Lebenszykluskosten bei Schienenfahrzeugen drastisch zu senken, verdeutlicht ein Vergleich mit dem Bus, der als konkurrierendes Verkehrsmittel zu Regional- und Stadtschienenfahrzeugen der heutige LCC-Maßstab ist (Bild 31).



**Bild 31** Vergleich der Lebenszykluskosten von Regionaltriebwagen und Bus ohne Entsorgungskosten [ALF00]

Aus dieser Grafik wird deutlich, dass insbesondere die Werkstattkosten eines Schienenfahrzeugs einen erheblichen und im Vergleich zum Bus deutlich höheren Anteil an den LCC aufweisen. Da diese Kosten bereits mit der Konstruktion und Fertigung des Fahrzeugs und seiner Komponenten zu 70%-80% [ALF99] bzw. zu 90% [BON97] festgelegt sind, werden bei Neubeschaffungen zukünftig die Kosten für Instandhaltungsaufwendungen vertraglich fixiert, d.h. der Hersteller muss dem Betreiber die entstehenden LCC garantieren. Da hierfür das Verschleiß- und Ausfallverhalten der Komponenten des Fahrzeugs im Zeitverlauf bekannt sein oder zumindest möglichst genau abgeschätzt werden muss, führt diese Entwicklung zum Einsatz standardisierter Komponenten mit bekannten Eigenschaften. Aus diesem Grund werden die Möglichkeiten zur Senkung der LCC in erheblichen Maße in einer Standardisierung gesehen, wobei die Ausführungsform einer Standardisierung differenzierte Ausprägungen haben kann [ATZ00]. So kann die Standardisierung neben Komponenten auch Abläufe in der Instandhaltung, Konstruktion und Fertigung, Schnittstellen, einzelne Module und Großserienkomponenten sowie ganze Fahrzeuge betreffen. Betrachtet man heutige Entwicklungen so ist davon auszugehen, dass zumindest eine Standardisierung von Aggregaten und zugehörigen Instandhaltungs-

prozessen auch im Interesse der Zuverlässigkeit dieser Komponenten und Verfahren zukünftig verstärkt vorangetrieben wird [SCI00].

#### **4.3.3 Verkürzung der Lieferzeiten**

Durch die öffentliche Ausschreibung von Verkehrsdienstleistungen erhält die Lieferzeit der Fahrzeuge eine verstärkte Bedeutung. Diese zum Teil kurzen Fristen zwischen einer Auftragsvergabe für ein neues Fahrzeug und einer gewünschten Inbetriebnahme von zum Teil unter 18 Monaten [FEL97a] lassen kaum Zeit für komplexe Neuentwicklungen und eine anschließende praktische Prüfung. Die Lösung besteht in dem Verzicht auf zeitaufwendige Neukonstruktionen und das Zurückgreifen auf bereits bekannte und geprüfte Lösungen und Komponenten, sog. Bookshelf-Lösungen. Kurze einzuhaltende Lieferfristen fördern daher eine herstellerseitige Standardisierung von Komponenten und Funktionskonzepten und wirken damit einer überhöhten Variantenbildung entgegen [GIE94].

#### **4.3.4 Interoperabilität und politische Entwicklungen**

Die europäischen Eisenbahnverbände sind bestrebt, den Anteil des Schienenverkehrs zu erhöhen und eine Ausweitung des grenzüberschreitenden Verkehrs voranzutreiben. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Richtlinien zur Verbesserung der Interoperabilität des Schienenverkehrs von der Europäischen Kommission entworfen, die eine Harmonisierung aller am Bahnbetrieb beteiligten Systeme in Europa bewirken sollen [UNI99, ZIJ00]. Hierzu zählen neben der Anpassung von Zulassungs- und Abnahmeverfahren auch die Harmonisierung der Infrastruktur einschließlich der Signal- und Stromsysteme, die Harmonisierung von betrieblichen Abläufen und letztendlich auch eine stärkere technische Vereinheitlichung bei den Fahrzeugen durch stärker funktional orientierte Lastenhefte und weniger technische Vorgaben. Die Umsetzung dieser Ansätze zur Vereinheitlichung wird von den einzelnen Ländern jedoch dadurch erschwert, dass nationale Interessen und Betriebsformen einer Vereinheitlichung vorangestellt werden. Aus diesen politischen Überlegungen ist derzeit nicht abzusehen, ob bereits mittelfristig umgesetzte einheitliche europäische Ausgangsbedingungen eine Erhöhung des Standardisierungsanteils im Bahnbetrieb ermöglichen. Langfristig sollte die Interoperabilität der Systeme jedoch zu einer Reduzierung der Variantenvielfalt aufgrund einer Vereinheitlichung von Richtlinien und technischen Systemen führen [Wie00].

#### 4.4 Resultierende Anforderungen aus den Szenarien

Die aufgeführten Entwicklungsszenarien des Schienenverkehrs verdeutlichen, dass bestimmte Tendenzen zu einer weiteren Erhöhung der Variantenvielfalt im Schienenfahrzeugbau führen, andere dagegen eine stärkere Standardisierung und Kostenreduktion fordern. Tab. 4 fasst diese Aspekte in Hinblick auf ihren Einfluss auf die Variantenvielfalt von Schienenfahrzeugen tabellarisch zusammen.

Lfd. Nr.	Einflussgröße	Gewichtung 3=hoch 1=niedrig	Vielfaltreduzierende Wirkung	Vielfalterhöhende Wirkung
1	Neue Einsatzfelder	2		●
2	Wettbewerb der Betreiber	3		●
3	Einsatzspezifikation	3		●
4	Exportgeschäft / Local-Content	2		●
5	Corporate design Konzepte	1		●
6	Entw. Verkehrsunternehmen / Subventionen	2	●	
7	LCC der Fahrzeuge	3	●	
8	Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit	3	●	
9	Interoperabilität und pol. Entw.	2	⊙	
10	Zulassung EU	2	●	
11	Zulassung national	2		●
	<b>Summe</b>		<b>12</b>	<b>13</b>

● = unmittelbarer Einfluss; ⊙ = unsicherer / langfristiger Einfluss

Tab. 4 Zusammenfassung der Entwicklung von Einflussgrößen auf die Variantenvielfalt bei Schienenfahrzeugen

Eine direkte und eindeutige Ableitung von Gestaltungsempfehlungen bzw. Handlungsmaßnahmen für den Schienenfahrzeugbau aus den beschriebenen Szenarien erscheint aus den Ergebnissen der Tab. 4 nicht möglich zu sein. Den aufgeführten Entwicklungen, die eine zukünftige Standardisierung der Fahrzeuge ermöglichen, stehen nahezu ebenso viele Aspekte gegenüber, die gegen eine Vereinheitlichung der Fahrzeuge sprechen. Weiterhin führen bestimmte Aspekte kurzfristig zu höherer, langfristig zu reduzierter Variantenvielfalt. So kann beispielsweise angenommen werden, dass der Wettbewerb der Betreiber kurzfristig zu einer höheren Varianten-

vielfalt im Sinne einer starken Kundenorientierung führt, langfristig der parallel dazu ansteigende Kostendruck im Schienenverkehr auf die Hersteller und der Wegfall staatlicher Förderungen wiederum eine stärkere Vereinheitlichung erforderlich macht.

Zusammenfassend ist zu folgern, dass ein kurz- *und* langfristig geeignetes Produkt- und Produktionskonzept im Schienenfahrzeugbau sowohl Voraussetzungen für eine hohe Individualisierung der Fahrzeuge bei einem *spezifikationsorientierten Szenario* schaffen, als auch für ein *kostenorientiertes Szenario* eine hohe Standardisierung der Fahrzeuge zur Erreichung von Kostenvorteilen ermöglichen muss. Weiterhin ist die zeitliche Variabilität der Anforderungen nach Standardisierung und Individualisierung konstruktiv und produktionstechnisch entsprechend zu berücksichtigen.

Die Entwicklung und Vorstellung eines derartigen Produkt- und Fertigungskonzeptes für Schienenfahrzeuge erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

## 5 Entwicklung des Lösungsansatzes

Der verfolgte Lösungsansatz dieser Arbeit beruht auf der Hypothese, dass ein wesentlicher Schlüssel für eine vereinfachte, wirtschaftliche Variantenbildung im Schienenfahrzeugbau in einer variationsorientierten Modularisierung der Produktstruktur des Wagenkastens und der Zuordnung geeigneter Produktionsprozesse liegt. Ziel dieser Kombination modularer Produktstrukturen und modulspezifischer Prozesse ist die Erhöhung der Flexibilität hinsichtlich kundenspezifischer Anforderungen bei größtmöglicher Produktivität und einer Verringerung der variationsbedingten Komplexität. Im folgenden wird auf Module, deren Bildung und Möglichkeiten zum Variantenmanagement eingegangen.

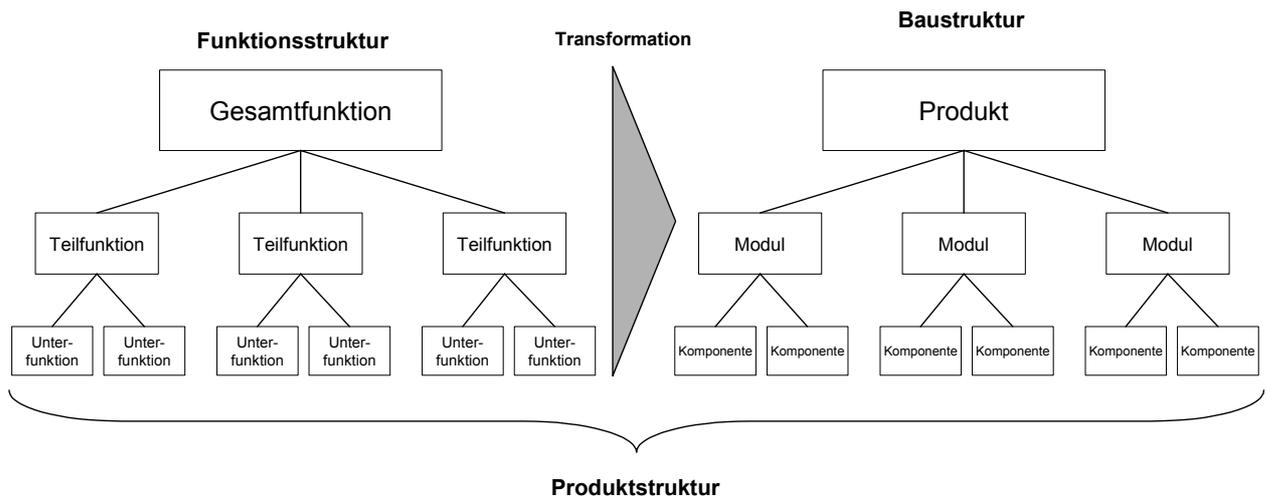
### 5.1 Modularisierung und Standardisierung

#### 5.1.1 Module und Modularisierung

##### 5.1.1.1 Definition und Ziele

Die Modularisierung eines Produktes wird als die Gliederung eines komplexen Produktes oder Systems in mehrere möglichst unabhängige Subsysteme, die sog. Module, verstanden [ERX98, ULR91, PAH97, PIL98]. Eine Modularisierung betrifft demnach in erster Linie die Produktstruktur und dient der Verringerung der inneren Produktkomplexität [EVE96]. Die Struktur eines Erzeugnisses wird definiert durch die Funktionsstruktur des Produktes, die Baustruktur sowie die zugehörige Transformationsstruktur zwischen Funktions- und Baustruktur [GRA99, SUH98, ULR95] (Bild 32). Eine Produktstruktur wird dann als modular bezeichnet, wenn ihre Baugruppen, die Module, sowohl *funktional* als auch *physisch* voneinander weitgehend unabhängig sind, wobei Teilfunktionen zur Erfüllung einer übergeordneten Anforderung in den Modulen geeignet zusammengefasst werden [GÖP98].

Hier grenzt sich die modulare Produktstruktur gegenüber Integral- und Differentialbauweisen ab. Während bei einer Differentialbauweise die Funktionsträger vorrangig nach fertigungstechnischen und funktionalen Aspekten physisch unabhängig voneinander gebildet werden, erfolgt bei einer Integralbauweise eine möglichst weitgehende Zusammenfassung von Funktionen in physisch abhängige, meist untrennbare Baugruppen unter Berücksichtigung fertigungstechnischer Kriterien. Die Modulbauweise kann demnach als zwischen diesen beiden Bauweisen einzuordnende Produktstruktur betrachtet werden.



**Bild 32** Produktstruktur als Ergebnis der Summe aus Funktions- und Baustruktur [GÖP98]

In der Literatur finden sich verschiedene Definitionen zu Modulen, die zum Teil im gegenseitigen Widerspruch und auch im Widerspruch zu dem genannten Ziel einer Modularisierung, der Komplexitätsreduktion, stehen. So besagt eine Definition von GÖPFERT, dass die Beziehung zwischen Funktionsstruktur und Baustruktur bei einer ausgeprägt modularen Bauweise eine 1:1-Relation aufweist. Wenn dagegen mehrere Bauteile zur Erfüllung der geforderten Funktion benötigt werden, besteht eine funktionale Abhängigkeit der Komponenten und eine 1:n-Relation zwischen Funktions- und Baustruktur und damit *keine* modulare Produktstruktur [ULR95a].

Eine sinnvolle praktische Umsetzung einer modularen Produktstruktur kann jedoch im Sinne einer Reduzierung der Komplexität nicht in einer 1:1-Relation zwischen Funktions- und Produktstruktur gesehen werden. Vielmehr sind Funktionen, die sich aus funktionalen, kundenspezifischen und unternehmensstrategischen Gründen vereinen lassen, und als modulkompatible Funktionen bezeichnet werden können, in Modulen zusammenzufassen, die als eigenständige, funktionsfähige Einheiten übergeordnete Funktionen erfüllen [ERX98, SUH99]. Im Sinne dieser Arbeit werden Module als weitgehend vormontierte, autonome, meist komplexe Baugruppen verstanden, die über definierte Schnittstellen verfügen und in ein Gesamtprodukt eingebunden werden. WEIBNER und EVERSHEIM definieren ein Modul als verbau-punktorientierte Baugruppe, die in funktionaler, logistischer und produktionstechnischer Sicht eine sinnvolle Einheit darstellt [WBN99] und die einen deutlich höheren Vormontage- als Einbauaufwand aufweist [EVE98]. Module reduzieren die Komplexität eines gesamten Produktes und können durch Konfiguration zu einer vereinfach-

ten *Produktvariantenbildung* genutzt werden [EVE89, SHU94]. In diesem Fall wird auch von Modulbaukastensystemen gesprochen [HAC97, KOH97]. Der *Produktvariantenbildung* durch die Konfiguration eines Produktes aus Modulen kommt in dieser Arbeit eine besondere Bedeutung zu. In verschiedenen Literaturstellen wird die Produktkonfiguration und Variantenbildung durch standardisierte Module als ein Hauptvorteil der Modularisierung gesehen [BAL98, PIN93]. Dementsprechend macht die englischsprachige Literatur auch keinen Unterschied zwischen Baukastensystemen und modularen Systemen [Pah97, PIL98]. TSENG beschreibt vor dem Hintergrund der kundenspezifischen Variantenbildung ein Vorgehen zur modularen Teilefamilienbildung, das bereits in der frühen Konstruktionsphase ansetzt. Ausgehend von der Formulierung funktionaler Anforderungen werden ähnliche Funktionen gruppiert und zugehörige Konstruktionsparameter identifiziert und einzelnen Bauelementen zugeordnet. Auf dieser Grundlage wird die entgeltliche Produktstruktur festgelegt [TSE96]. Ein ähnliches Verfahren beschreibt auch Erixon zur Modularisierung von Produkten für eine Variantenbildung [ERX98].

Die Motivation zur Bildung modularer Produktstrukturen kann sehr verschieden sein. So werden in zahlreichen Literaturstellen in Abhängigkeit vom Produkt und markttechnischen Rahmenbedingungen sowohl konstruktions- und produktionstechnische, als auch organisatorische und logistische Aspekte sowie Aspekte der Demontage genannt [ALT99, GÖP98, GRA99, SEL97, ULR91]. Allgemein lässt sich die Motivation zur Modularisierung von Produkten in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Ermöglichung einer verteilten Produktentwicklung und –entstehung durch parallele Modulbearbeitung und damit Verkürzung der time-to-market-Zyklen,
- Reduzierung der Produktkomplexität durch höhere Transparenz in der Produktstruktur (kleinere, abgeschlossene Subsysteme verminderter Komplexität),
- Mehrfachverwendung von standardisierten Modulen in verschiedenen Produktvarianten und Produkttypen (economies of scale),
- Leichtere Konfiguration und Anpassbarkeit von Produkten aus standardisierten Modulen (Variantenbildung mit Hilfe von Baukastensystemen) sowie
- Vereinfachte Instandhaltung und Erhöhung der Produktverfügbarkeit durch den schnellen und leichten Austausch von defekten Modulen.

In Zusammenhang mit Modulbauweisen und Bildung von Produktvarianten wird vielfach auch der Begriff des Plattformkonzeptes verwendet. Plattformkonzepte beschreiben eine bestimmte Art eines Variantenmanagements unter Verwendung von

Modulen, wobei meist mehrere Module die Plattform bilden, die für verschiedene Produktvarianten oder auch –typen genutzt wird [BLA98, GUI99]. Eine Plattform kann verschiedene Ausprägungen haben. Über die Nutzung einheitlicher Komponenten oder Baugruppen für Produktvarianten hinausgehend können Plattformen auf der Nutzung von standardisierten Prozessen und Technologien, auf der Basis von Kernkompetenzen und Wissen oder auf festgelegten organisatorischen und logistischen Abläufen und Wertschöpfungsnetzwerken basieren [WAR99, SCH01]. Im Gegensatz zu der alleinigen Standardisierung von Bauteilen und Komponenten verfolgen ganzheitliche Plattformkonzepte parallel meist mehrere der genannten Ansätze [SAW98, SEL00, WIE99]. Bild 33 fasst die möglichen Ausprägungsformen von Plattformen grafisch zusammen.

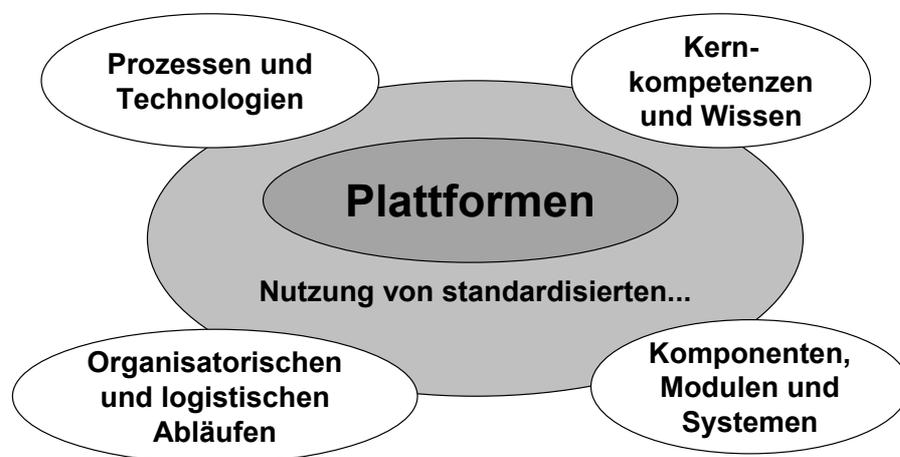
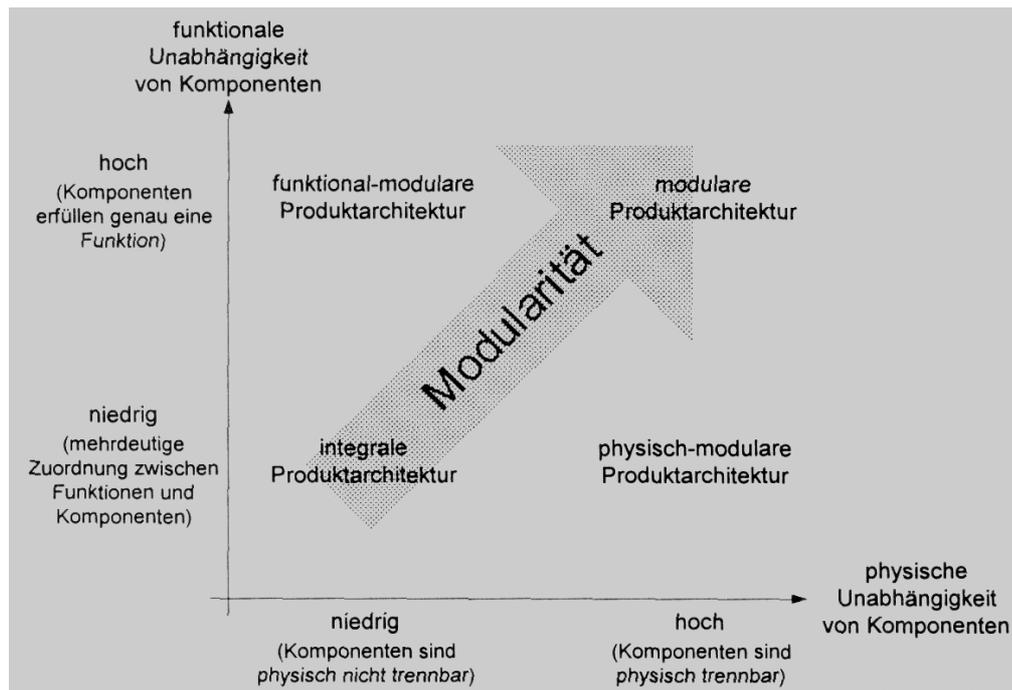


Bild 33 Ausprägungen von Plattformkonzepten [SEL00]

### 5.1.1.2 Typen und Arten der Modularität

Die vorangegangene Definition besagt, dass Modularität eine Unabhängigkeit der Module hinsichtlich der Produktfunktionen und eine physische Trennbarkeit voraussetzt. Daraus abgeleitet kann eine Matrix mit vier Feldern aufgestellt werden, in welche die Produkte hinsichtlich des Typs ihrer Modularität eingeordnet werden können [GÖP98]. In Anlehnung an diese Matrix können Produkte in *mehr* oder *weniger modular* gegliedert werden.



**Bild 34** Typen der Modularität [GÖP98]

Aus dieser Matrix ergeben sich vier Typen der Modularität entsprechend dem Grad der funktionalen und physischen Unabhängigkeit der Produktkomponenten [GÖP98]:

1. *Modulare Produktstruktur*: Die modulare Produktstruktur besteht aus geschlossenen Einheiten, die sowohl physisch als auch funktional unabhängig sind. Diese Einheiten heißen Module. Ein typisches modular aufgebautes Erzeugnis ist der Personalcomputer.
2. *Integrale Produktstruktur*: Die Komponenten integraler Produkte weisen starke funktionale und physische Abhängigkeiten auf. Die Produktbestandteile erfüllen jeweils mehrere Funktionen und haben nur schwer trennbare Schnittstellen. Die integrale Produktstruktur ist das Gegenstück zur modularen Produktstruktur. Ein einfaches Beispiel für ein integrales Produkt ist ein konventioneller Bleistift. Mine und Holzummantelung lassen sich physisch nicht trennen und nur in der Kombination ist der Bleistift gebrauchsfähig. D.h. er erfüllt seine Funktion ausschließlich unter der Kombination seiner beiden Elemente.
3. *Funktional-modulare Produktstruktur*: Das Produkt besitzt funktional relativ unabhängige Komponenten, die jedoch einen starken physischen Zusammenhang aufweisen. Die Schnittstellen sind zumindest in der Nutzungsphase nur schwer zu trennen. Ein Beispiel hierfür sind Multifunktionswerkzeuge. So lässt sich der Fla-

schenöffner eines Schweizer Taschenmessers gleichzeitig als Schraubendreher verwenden.

4. *Physisch-modulare Produktstruktur*: In diesem Fall weist das Produkt leicht trennbare Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten auf, die jedoch nur im Zusammenwirken miteinander die Funktionen des Produktes erfüllen. Ein Rennrad ist ein Beispiel hierfür: Ein Rad oder der Sattel lassen sich zwar physisch schnell trennen, die Funktion der Fortbewegung erfüllt das Rad aber nur in Verbindung mit allen Komponenten.

Zur Differenzierung verschiedener Arten der Modularisierung unterscheidet *PILLER* in der Praxis vier verschiedene Arten der Modularisierung: *Generische Modularisierung*, *quantitative Modularisierung*, *individuelle Modularisierung* sowie *freie Modularisierung* [PIL98]:

- Die *generische Modularisierung* bezieht sich auf Produktstrukturen, bei denen die Zusammensetzung des Produktes durch stets die *gleiche Zahl* standardisierter Bauteile auf einer fixen Plattform vorgenommen wird. Dabei können die einzelnen Bauteile unterschiedliche Leistungsmerkmale und Ausprägungen aufweisen. Ein Beispiel hierfür wäre die Zusammenstellung einer Uhr aus den Modulen Uhrkörper (als Plattform), Armbandmodul oben, Armbandmodul unten und dem Verschlussstück. Diese Form der Modularisierung setzt beispielsweise die Firma *SWATCH* mit modischen Uhren um. Diese Art der Modularisierung wird vielfach auch als Plattformkonzept beschrieben.
- *Quantitative Modularisierung* ist die Zusammensetzung von Produkten aus unterschiedlich vielen genutzten generischen Komponenten auf einem Basismodul. Dabei werden alle Module nach Festlegung von standardisierten Schnittstellen auftragsunabhängig konstruiert und vorgefertigt. Als klassisches Beispiel für diese Form der Modularisierung ist der modulare Aufbau eines Personal Computers zu nennen. Diese Art der Modularisierung wird ebenfalls vielfach als Plattformkonzept bezeichnet.
- Die individuelle Zusammensetzung von Produkten auf der Grundlage eines Basisproduktes sowie aus Modulen in fixer oder variabler Anzahl wird als *individuelle Modularisierung* bezeichnet. Dabei können die Module kundenindividuell gefertigt sein oder aus einem vorgefertigten Standardsatz stammen, wobei die kundenindividuell gefertigten Module erst nach Eingang eines konkreten Auftrags hergestellt werden. Diese Art der Modularisierung betrifft zum Beispiel Produkte für Kunden mit außergewöhnlichen Körpermaßen, wie z.B.

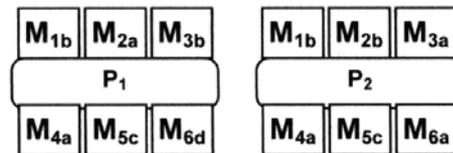
Betten, Bürostühle, Fahrräder, Kleidung etc. Da auch diese Art der Modularisierung auf einem Basisprodukt aufsetzt, wird auch hier von einem Plattformkonzept gesprochen.

- *Freie Modularisierung* beschreibt Produktstrukturen ohne einheitliches Basisprodukt. Standardisierte und kundenindividuelle Module werden beliebig zu einem auftragspezifischen Produkt kombiniert. Lego-Steine sind hierfür ein klassisches Beispiel. Aus einer geringen Zahl von Grundelementen und zusätzlichen nicht-standardisierten Elementen lassen sich nahezu unbegrenzt viele Objekte erstellen. Da bei dieser Art kein Basisprodukt vorhanden ist, wird diese Art der Modularisierung auch nicht als Plattformkonzept beschrieben.

Bild 35 zeigt die graphische Darstellung der Arten der Modularisierung.

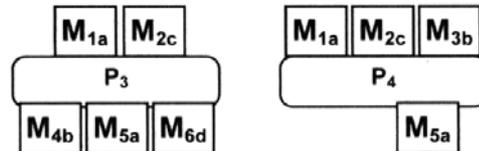
**Generische Modularisierung:**

Zusammensetzung eines Produkts durch stets die gleiche Zahl standardisierter Bauteile, die jeweils unterschiedliche Leistungsmerkmale aufweisen können, auf einer fixen Plattform.



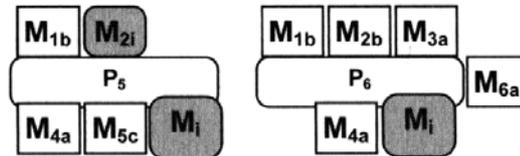
**Quantitative Modularisierung:**

Zusammensetzung von Produkten mit unterschiedlich vielen eingebauten generischen Komponenten auf einem Basismodul.



**Individuelle Modularisierung:**

Zusammensetzung von Produkten aus Modulen in fixer oder variabler Zahl, die teilweise kundenindividuell, teilweise aus einem Standardsatz stammen, auf Grundlage eines Basisprodukts.



**Freie Modularisierung:**

Freie Kombination standardisierter und individueller Module ohne die Notwendigkeit eines einheitlichen Basisprodukts.

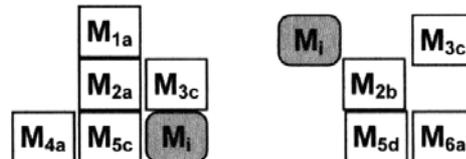


Bild 35 Formen der Modularisierung [PIL98]

Für die Umsetzung im Schienenfahrzeugbau erscheinen die Formen der *individuellen Modularisierung* und der *freien Modularisierung* als Werkzeuge zur vereinfachten

Variantenbildung für geeignet. Beide Formen der Modularisierung beinhalten die Nutzung standardisierter Module, erlauben jedoch eine im Vergleich zur generischen und quantitativen Modularisierung höhere Kundenorientierung durch die Nutzung individueller Module. Es ist nun nachfolgend zu klären, auf welcher Ebene die Standardisierung bei Schienenfahrzeugen anzusetzen ist.

### 5.1.2 Standardisierungsebenen

Die hier verwendete Bedeutung des Begriffes Standardisierung steht für einen systematischen Einsatz von Vereinheitlichung. Ziel einer Vereinheitlichung im Sinne dieser Arbeit ist die wirtschaftliche Herstellung von Produktvarianten durch die Mehrfachnutzung standardisierter Komponenten, umfangreicher Produktmodule und einheitlicher Prozesse. Neben der Reduzierung des Entwicklungsaufwandes und der Variantenbildung hat die Standardisierung die Sicherstellung gleichbleibend hoher Qualität, die Gewährleistung von kurzen Lieferzeiten und eine vereinfachte Ersatzteilbeschaffung zum Ziel. Die grundsätzlichen Potenziale einer Standardisierung und konsequenten Gleichteileverwendung bestätigen auch *COENERG UND PRILLMANN*, die in einer Langzeitstudie in der Elektroindustrie aufzeigen, dass erfolgreiche Unternehmen sich durch eine einfachere, baukastenartige Produktstrukturen auszeichnen. Danach haben weniger erfolgreiche Unternehmen im Durchschnitt 1,7 mal mehr Varianten, 4 mal mehr Submodule und 4,5 mal mehr Teile als die erfolgreichen Konkurrenten [COE95].

Die Potenziale und Auswirkungen einer Standardisierung im Schienenfahrzeugbau hinsichtlich einer vereinfachten wirtschaftlichen Variantenbildung hängen davon ab, auf welcher Ebene des Produktes sie ansetzt. Hierfür existieren grundsätzlich folgende Alternativen, wobei höhere Ebenen niedere beinhalten können:

- **Gesamtfahrzeugebene:** Standardfahrzeuge mit nur wenigen, gering komplexen Anpassungsoptionen.
- **Fahrzeugstrukturebene / Modulebene:** Größere Funktionseinheiten des Fahrzeugs, vor allem die Hauptbaugruppen des Wagenkastens, sind standardisiert und können auftragsspezifisch baukastenartig kombiniert werden.
- **Komponenten:** Abgeschlossene, kleinere Funktionseinheiten hauptsächlich auf Aggregat- und Komponentenebene werden vereinheitlicht und für möglichst viele Schienenfahrzeugvarianten und –typen genutzt.
- **Funktions- und Lösungsprinzipien:** Nutzung standardisierter technischer Lösungs- und Baukonzepte sowie Produktionstechniken und Prozesse.

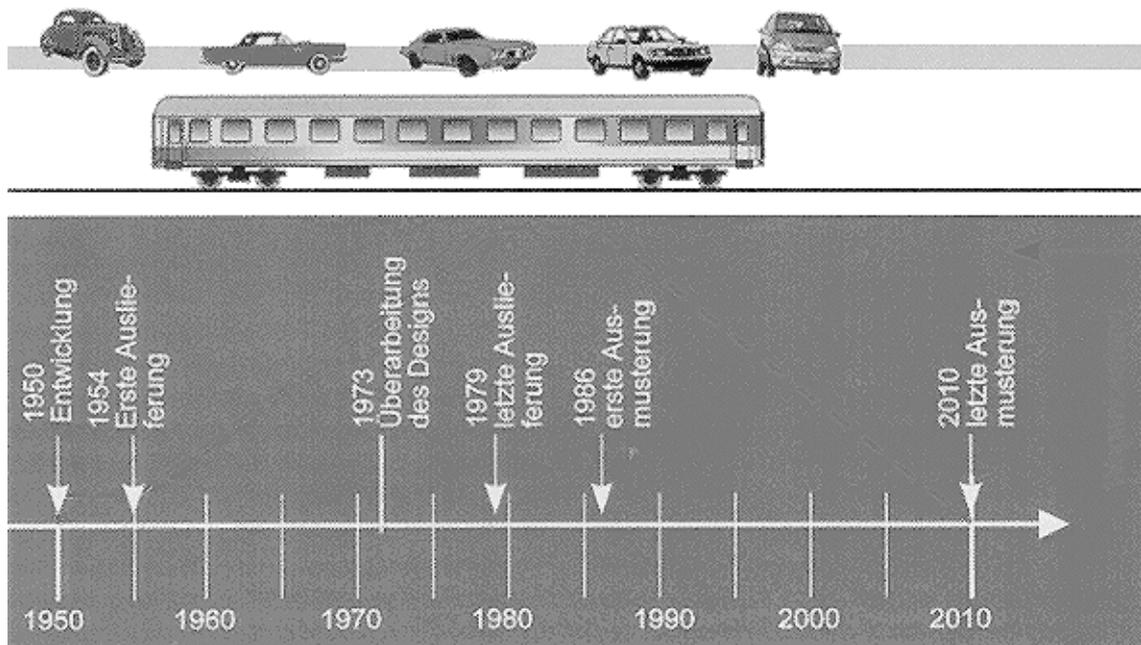
Standardisierung führt stets zu einer Beschränkung der Flexibilität in der Konstruktion und Prozessauswahl, da bestimmte Bereiche, die durch eine Standardisierung festgelegt wurden, nicht mehr beliebig an Kundenwünsche angepasst werden können. Eine konsequente Standardisierung kann demnach dazu führen, dass bestimmte Marktsegmente anbieterseitig nicht bedient werden. In der oben aufgeführten Reihenfolge der Standardisierungsebenen kann die Flexibilität von oben nach unten als zunehmend betrachtet werden.

Nachfolgend werden die einzelnen oben aufgeführten Standardisierungsebenen beschrieben und diskutiert.

### **5.1.2.1 Standardfahrzeug**

Ein Standardfahrzeugs bietet für Hersteller und Betreiber das größte Potenzial für eine Aufwands- und Komplexitätsreduktion (siehe S. 73). Für ein Einsatzgebiet, beispielsweise den gesamten Regional- oder S-Bahn-Verkehr einer oder mehrerer Betreibergesellschaften, wird nur ein spezifizierter Fahrzeugtyp entwickelt und über lange Zeiträume gefertigt und beschafft. Die Anpassung des Standardfahrzeugs an spezifische Vorgaben und Einsatzbedingungen erfolgt dabei über wenige, gering komplexe, vom Hersteller fest definierte Optionen. Diese beschränken sich in erster Linie auf Aggregate, Innenausbauvarianten, Fahrzeuglackierung und ggf. die Fahrzeugkopfform. Anforderungen, die über diese Optionen hinausgehen, werden vom Hersteller nicht berücksichtigt. Vorrichtungen und Arbeitsabläufe werden für diesen Fahrzeugtyp spezifiziert und für höhere Losgrößen optimiert. Der Fixkostenanteil kann dadurch pro Fahrzeug deutlich reduziert werden (siehe S. 18). Gute Voraussetzungen für den Einsatz von Standardfahrzeugen existierten in der Vergangenheit durch die faktischen Monopole der Staatsbahnen, die auch meist Standardfahrzeuge einsetzten. Diese Fahrzeuge wurden durch die damalige Deutsche Bundesbahn in Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt, in hohen Stückzahlen produziert und über Jahrzehnte hinweg eingesetzt.

Der Einsatz von Standardfahrzeugen beinhaltet jedoch auch Nachteile. Da die Standardisierung des Fahrzeugs nicht nur über einen Einsatzbereich, sondern auch über einen sehr langen Nutzungszeitraum, bei Schienenfahrzeugen bis zu 60 Jahren, wirksam ist, findet eine Modernisierung beziehungsweise eine Anpassung an den technischen Fortschritt oder veränderte Anforderungen im Unterschied beispielsweise zur Automobilentwicklung deutlich seltener statt.



**Bild 36** Lebenszyklus eines Nahverkehrswagens, Typ Y UIC [KLE99]

Dies begründet zum Teil die technologische Rückständigkeit der Schienenfahrzeugindustrie im Vergleich zu anderen Branchen.

Weiterhin führt die geringe Flexibilität des Fahrzeugs hinsichtlich geometrischer Änderungen am Wagenkasten oder bestimmter Bauweisen zu einem kleineren Absatzmarkt für den Hersteller, da bestimmte Marktsegmente nicht bedient werden können. Dies führt zu erheblichen betriebswirtschaftlichen Risiken, da die abzusetzenden Gesamtstückzahlen im Schienenfahrzeugmarkt eine Spezialisierung auf wenige Konzepte kaum ermöglichen. So besteht beispielsweise im westeuropäischen Nahverkehr ein jährlicher Gesamtbedarf von etwa 500 Fahrzeugen, die sich in 8 Grundtypen untergliedern und auf die einzelnen Hersteller aufteilen [GIE94]. Die verbleibenden Fahrzeuge pro Anbieter sind dann weiterhin an die jeweiligen Einsatzspezifikationen anzupassen und erfordern somit eine weitere Variantenbildung.

In der Branche wird davon ausgegangen, dass zukünftig die vom Bahnbetreiber ausgehende Nachfrage eines Standardfahrzeuges verschwinden wird [KAR00]. Die Gründe hierfür sind in der zunehmenden Zahl der im Wettbewerb stehenden kleineren Fahrzeugbetreiber infolge der Regionalisierung zu sehen, wodurch die Zahl der Fahrzeuge je Auftrag sinkt und die Vielfalt der heterogenen Anforderungen steigt (siehe auch S. 52). Aufgrund der geringen Flexibilität dieses Konzeptes hinsichtlich Anpassungen an Kundenwünsche und Einsatzspezifikationen erscheint eine Standardisierung auf der Gesamtfahrzeugebene trotz der zu erzielenden wirtschaftlichen

Effekte bei einem Folgeauftrag für das Fahrzeug (siehe S. 74) kein geeigneter Ansatz für ein Variantenmanagement im Wagenkastenbau zu sein.

### 5.1.2.2 Standardisierung von Wagenkastensegmenten

Eine Standardisierung von Bereichen des Wagenkastens setzt eine neuartige Gliederung der Produktstruktur des bisher einteiligen Waggons in Module oder Segmente voraus. Dies beinhaltet die Abkehr von einem geschlossenen, röhrenförmigen und einteiligen Fahrzeugstrukturkonzept zu einer Bauweise, die eine Entstehung des Wagenkastens durch die Montage von vorgefertigten Segmenten oder Modulen ermöglicht. Dieser Standardisierungsansatz verfolgt nach *PAHL*, *BEITZ* die Bauform eines Baukastensystems mit geschlossenem Bauprogramm [PAH97]. Fahrzeuge können durch die Konfiguration standardisierter, anbieterseitig festgelegter Bauelemente, den Modulen oder Segmenten, auftragsspezifisch zusammengestellt werden. Der Entwicklungs- und Fertigungsprozess der Module kann dabei vom auftragspezifischen Konfigurationsprozess entkoppelt stattfinden. Mit diesem Ansatz kann beispielsweise die Länge und damit Kapazität des Fahrzeugs, die Breite und Höhe sowie die Fenster- und Türanzahl variiert werden, oder das Fahrzeug kann durch den Einsatz entsprechender Module als Ein- oder Zweirichtungsfahrzeug ausgeführt werden. Die einzelnen Module müssen bei einem derartigen Baukastenkonzept auf die Fahrzeugkonfiguration mit der höchsten mechanischen Belastung ausgelegt sein oder es sind nach erfolgter Konfiguration des Fahrzeugs zusätzliche Verstärkungen in das Fahrzeug einzubringen.

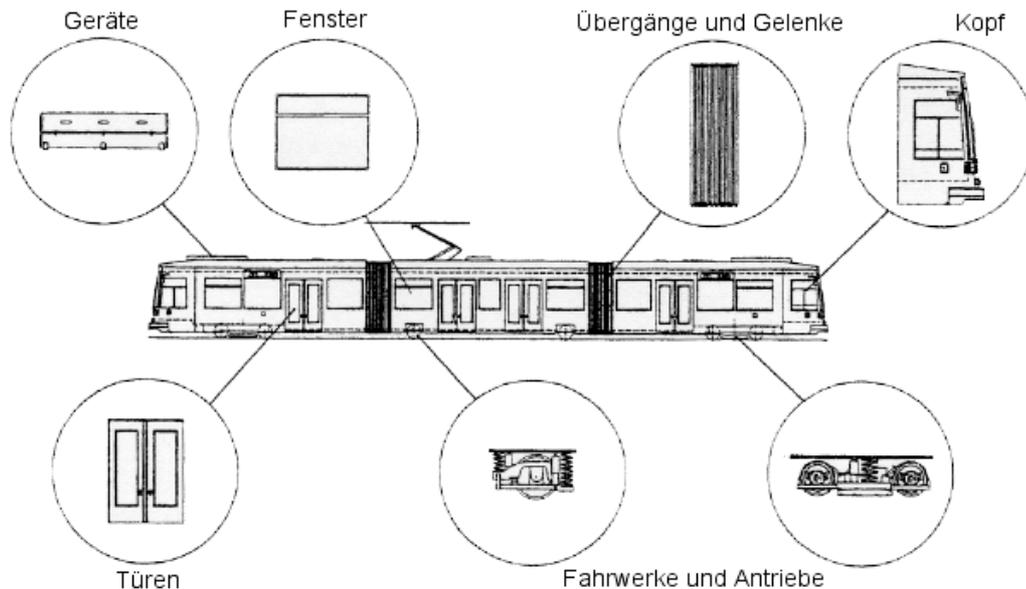
Derartige baukastenartige Fahrzeugkonzepte werden heute zum Teil bereits als sogenannte Modul- oder Plattformbauweisen umgesetzt. Der Umfang der Standardisierung und damit die Flexibilität des Konzepts, die Gestaltung der Module sowie das vorrangige Ziel dieser umgesetzten Konzepte weichen dabei stark voneinander ab. Es wird jedoch übereinstimmend innerhalb der Branche davon ausgegangen, dass eine Standardisierung auf Modulebene des Wagenkastens einen geeigneten Standardisierungsansatz darstellt, da in Abhängigkeit von der Ausführung eine vereinfachte auftragsspezifische Anpassung der Fahrzeuge bei hinreichend hoher Flexibilität und kurzer Durchlaufzeit erreicht werden kann [GIE94, KAR00, PAU00, TRE00]. Weiterhin führt die Modularisierung der Fahrzeugstruktur zu weiteren Vorteilen in den Bereich Entwicklung, Produktionsvorbereitung, Fertigung und Montage, auf die nachfolgend noch weiter eingegangen wird [ALT92, HAC97]. Aus den aufgeführten Gründen wird in dieser Arbeit der Ansatz der Modularisierung des Wagenkastens als geeignetes Werkzeug zum Variantenmanagement gesehen und in den folgenden Kapiteln vertiefend behandelt.

### 5.1.2.3 Standardisierung von Komponenten

Die Standardisierung auf Komponentenebene umfasst die Vereinheitlichung von Komponenten des Fahrzeugkonzeptes, wie Drehgestell und Traktionsart, die Standardisierung von zur Fahrzeugstruktur gehörender Baugruppen, wie Fenster, Türen, Übergänge, und die Vereinheitlichung von technischen Aggregaten, wie Klimaanlage, Stromumformer und Transformatoren. Hierdurch lassen sich zum Teil erhebliche Einsparungen über Mengenvorteile (*economies of scale*) hauptsächlich im Einkauf und in der Administration erreichen. Darüber hinausgehende positive Auswirkungen auf den Entwicklungsaufwand eines Fahrzeugs bzw. auf dessen Struktur sind dagegen weniger zu erwarten.

Die Umsetzung einer Standardisierung insbesondere von elektrischen Aggregaten kann jedoch dazu führen, dass ein Kunde, der beispielsweise ein Fahrzeug mit einem anbieterseitig nicht vorgesehenen oder inkompatiblen Klimaaggregat, für das er Ersatzteile vorhält, ausgerüstet haben möchte, nicht bedient werden kann. Dementsprechend kommt der Auswahl der zu vereinheitlichten Komponenten und der Generierung der zugehörigen funktionalen und baulichen Schnittstellen eine hohe Bedeutung zu. Die Umsetzung einer Standardisierung und Modulbildung auf Komponentenebene erfolgt bereits bei vielen Herstellern der Schienenfahrzeugbranche als auch in vergleichbaren Branchen. Es treten jedoch dabei in der Praxis immer wieder Schwierigkeiten hinsichtlich der Integration kundenspezifischer Komponenten auf [KÖR00a, WIT98]]. Vielfach wird diese Form der Standardisierung mit dem Ziel der Identifikation und Bereinigung von nicht erforderlichen oder gering nachgefragten, variantenbildenden Komponenten auch als *Produktprogrammbereinigung* bezeichnet.

Bild 37 zeigt Komponenten eines Schienenfahrzeugs, die bereits heute in hohem Maße vereinheitlicht für mehrere Fahrzeugvarianten und –typen genutzt werden.



**Bild 37** Standardisierung über vereinheitlichte Komponenten [GIE94]

Die Standardisierung von Komponenten, wie sie oben beschrieben ist, stellt im Rahmen dieser Arbeit einen wesentlichen Bestandteil des Variantenmanagements im Wagenkastenbau dar und wird als Voraussetzung für einen weitergehenden Ansatz für eine Variantenbildung im Wagenkastenbau zur Erzielung von Kostenvorteilen gesehen. Aufgrund der Konzentration auf die Wagenkastenstruktur in dieser Arbeit wird auf die Standardisierung von Komponenten hier nicht weiterführend eingegangen. Sie wird vielmehr als dem Wagenkastenbau zeitlich vorgeschalteter und abgeschlossener Standardisierungsprozess angenommen.

#### **5.1.2.4 Standardisierung von Lösungs- und Funktionsprinzipien**

Die Standardisierung von Lösungs- und Funktionsprinzipien umfasst die Vereinheitlichung von prinzipiellen technischen Lösungskonzepten für bestimmte Anforderungen, den Einsatz weitgehend standardisierter Prozesse und Abläufe sowie von standardisierten Bauformen und –elementen. Die Einführung von geschlossenen CIM-Konzepten im Schienenfahrzeugbau in den letzten Jahren schaffte erste Voraussetzungen für die Standardisierung von Prozessen und organisatorischen Abläufen. Hersteller konzentrieren sich zunehmend auf die einheitliche Fertigung von bestimmten Bauweisen, wie Differential- oder Integralbauweisen. Weiterhin werden Anstrengungen unternommen, wesentliche Bauelemente, wie beispielsweise Halbzeuge und Profile, und Prozesstechniken, wie Füge- und Umformtechniken, an ei-

nem Fahrzeug zu vereinheitlichen und auf weitere Produkttypen zu übertragen [ALT92, ALT99].

Diesen Anstrengungen stehen jedoch heute noch spezifische Forderungen der Auftraggeber entgegen. So wird beispielsweise ein umgesetztes Fahrzeugkonzept in Aluminium-Integralbauweise für den Einsatz in tropischen Regionen auftragsspezifisch in einer Differentialbauweise unter Einsatz rostträger oder nichtrostender Stähle entwickelt. Weiterhin werden bestimmte Fügeverfahren nicht von allen Betreibern für den Einsatz in ihren Fahrzeugen akzeptiert. Hier müssen auftragsspezifische Lösungen entwickelt und umgesetzt werden, die möglicherweise einer Prozessstandardisierung entgegen stehen. Diese Beispiele verdeutlichen, dass Standardisierungsansätze, die sich auf Bauprinzipien und bestimmte Lösungskonzepte konzentrieren, nicht alleine durch die Hersteller umsetzbar sind. Es sind auch entsprechende Standardisierungen der Anforderungen bei den Betreibern vorzunehmen, die sich beispielsweise in allgemeinen Funktions- und nicht in technischen Konstruktionslastenheften niederschlagen [ZIJ00].

Eine umsetzbare Standardisierung auf Lösungs- und Funktionsebene ist, wie anfangs aufgeführt, vor allem in der Vereinheitlichung und Optimierung der organisatorischen Prozesse und Abläufe, die Nutzung flexibler Fertigungstechnologien sowie durch den Einsatz leistungsfähiger Informationstechniken und geschlossener CAD/CAM-Ketten zu sehen. Hierdurch ist die Generierung von Fahrzeugvarianten mit einem reduzierten Entwicklungs- und Fertigungsaufwand möglich, da die einzelnen Prozessschritte beibehalten werden. Eine derart systematische und prozessorientierte Vorgehensweise während der Auftragsabwicklung, Entwicklung, Produktionsvorbereitung und Fertigung im Schienenfahrzeugbau existiert jedoch bis heute nur unzureichend, so dass die positiven Effekte einer Prozessstandardisierung bis heute kaum genutzt werden können [ALT99, BAL97, FEL97a].

Eine grafische Darstellung der aufgeführten Standardisierungsebenen in Relation zur erreichbaren Kundeorientierung zeigt Bild 38. Eine Standardisierung auf Modul-, Komponenten- und Technologieebene wird zusammenfassend als Plattformkonzept beschrieben. Das Plattformkonzept ermöglicht unter der Nutzung standardisierter Komponenten oder Prozesse die Bildung von Produktvarianten. Dies entspricht der Definition eines Plattformkonzeptes aus Kapitel 5.1.1.2.

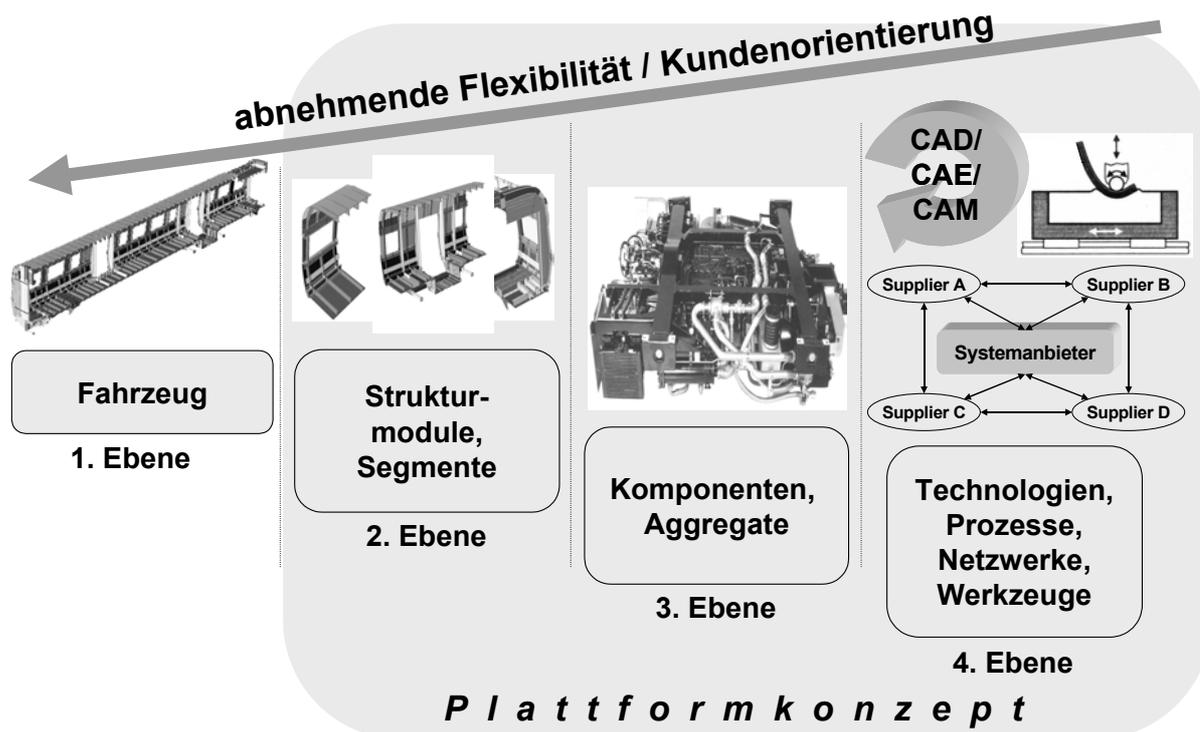


Bild 38 Standardisierungsebenen im Waggonbau

### 5.1.3 Bewertung der Einsparpotenziale

Übergeordnetes Ziel einer Standardisierung ist die Reduzierung des Aufwandes für eine Folgeanwendung, woraus sich Kosteneinsparungseffekte ergeben (siehe Kapitel 5.1.2). Dieses Ziel ist unabhängig vom gewählten Ansatz und von der Standardisierungsebene. Zur Bewertung und Einschätzung der Effekte eines geeigneten Standardisierungsansatzes sind die Auswirkungen auf die Einsparung in den Bereichen Entwicklung, Produktion und Logistik zu analysieren.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Prozess einer Standardisierung stets, unabhängig von der Standardisierungsebene, umfangreiche Konstruktions-, Organisations- und Koordinierungsarbeiten in Anspruch nimmt [PIL98, WAR99]. Dieser Aufwand ist bei der Planung und Wirtschaftlichkeitsabschätzung von Standardisierungskonzepten mit einzubeziehen. Ein zu hoher erforderlicher Aufwand kann ggf. dazu führen, dass ein Standardisierungsansatz keine wirtschaftlichen Effekte erzielt. Direkte Bewertungen über Aufwände eines Standardisierungsprozesses sind bisher nur qualitativ veröffentlicht worden. Es wird hierbei jedoch betont, dass die Entwicklung von Plattformen aufgrund der hohen Engineeringtiefe, der umfangreichen notwendigen Technologieschritte und Prozessveränderungen hohe Entwicklungszeiten

beansprucht und umfangreiche Ressourcen bindet [BOU97]. In der Automobilindustrie wird von Aufwänden zur Entwicklung und Produktionsvorbereitung von plattformartigen Standardisierungskonzepten in Höhe von 2-3 Milliarden DM gesprochen [KUH99]. Diese Aufwendungen müssen durch Einsparungen in Folge der Standardisierung bei späteren Aufträgen entsprechend ausgeglichen werden können.

Über das Ausmaß direkter Einsparungen durch Standardisierungen im Schienenfahrzeugbau sind bisher nur wenige Informationen veröffentlicht worden. Eine nutzbare, vergleichende Darstellung beschreibt *GIESEN* in Bild 39.

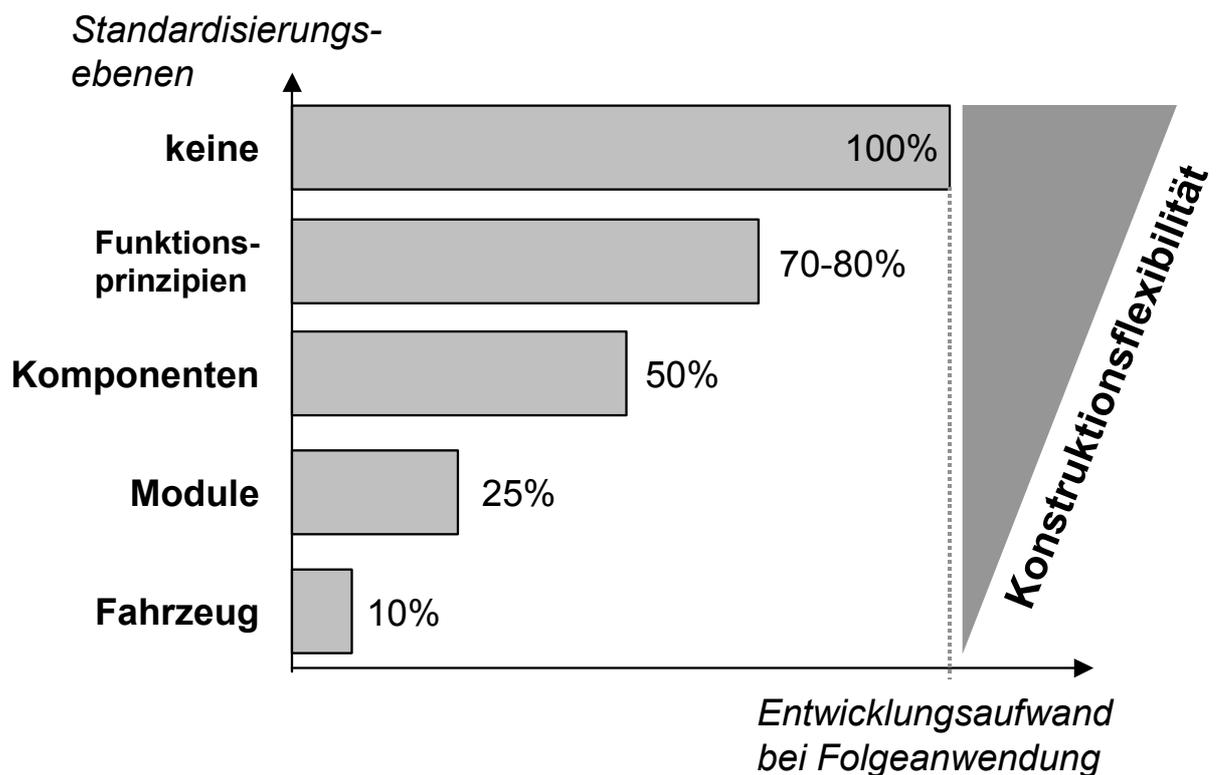


Bild 39 Aufwandsverringern bei verschiedenen Standardisierungsebenen, [GIE94, verändert]

Aus Bild 39 kann abgeleitet werden, dass sich ein geeigneter Standardisierungsansatz über mehrere Ebenen parallel erstrecken muss, wenn Aufwandsverringern und Flexibilität gleichermaßen angestrebt werden.

Aus den obigen Betrachtungen wird deutlich, dass ein Standardisierungskonzept stets einen geeigneten Kompromiss zwischen den zu erzielenden Einsparungseffekten und einer den Marktanforderungen entsprechenden Kundenorientierung im Sinne einer Produktflexibilität darstellen muss. Eine umfangreiche anbieterseitige Standardisierung schließt stets eine bewusste Beschränkung der Variantenvielfalt im Sinne

eines geplanten Ausschlusses bestimmter Kundenanfragen ein. Deutlich geworden ist auch, dass die historisch gewachsene Stärke der Bahnindustrie, ihren Kunden anforderungsgerechte Produkte anbieten zu können, nur dann zu vertretbaren Kosten möglich bleibt, wenn durch intelligente Bauweisen und flexible Prozesse unterschiedliche Anforderungen mit einem hohen Maß an Standardisierung befriedigt werden.

Einen hierfür geeigneten Ansatz scheint das Konzept der *Standardisierung auf Modulebene* darzustellen. Aus diesem Grund wird auf derartige Bauweisen nachfolgend vertiefend eingegangen. Um die daraus resultierenden Effekte im Vorfeld besser abschätzen zu können und einen Erkenntniszuwachs zu erhalten, sowie eine mögliche Übertragbarkeit modularer Konzepte aus anderen Branchen zu prüfen, erfolgt im Anschluss eine Analogiebetrachtung von modularen Bauweisen bei Bussen. Busse weisen aufgrund ihrer Gerippekonstruktion einen vergleichbaren Aufbau wie Schienenfahrzeuge auf und es werden ähnliche Marktanforderungen hinsichtlich der Einsatzspezifikation an sie gestellt. Sie erscheinen daher für eine Analogiebetrachtung als geeignet.

## **5.2 Analogiebetrachtung modularer Bauweisen**

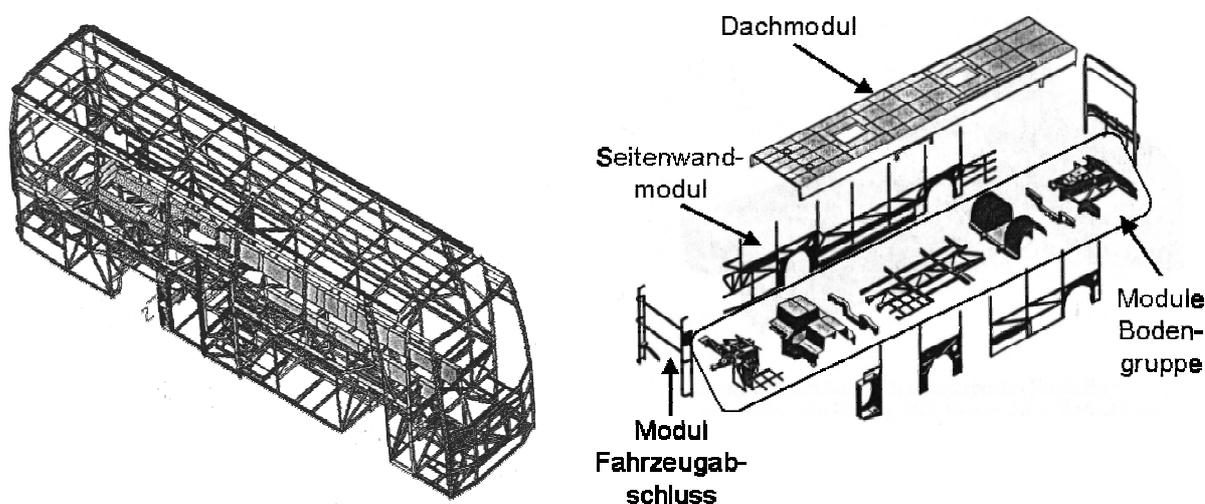
Im Fahrzeugbau und insbesondere bezogen auf die Fahrzeugstruktur wird der Begriff der Modularisierung vielfach mit dem Begriff der Segmentierung gleichgesetzt. Segmentierung bedeutet hier eine Zerlegung der kompletten Fahrzeugstruktur in entsprechende, kleinere Baugruppen, die Segmente. Im Unterschied zur Modularisierung werden bei der Segmentierung die einzelnen Segmente nicht unbedingt weitgehend vormontiert und komplettiert. Die einzelnen Segmente besitzen eine ausgeprägte physische und funktionale Abhängigkeit zueinander, können jedoch unabhängig voneinander entwickelt, gefertigt und geprüft sowie vereinfacht gehandhabt und transportiert werden.

Die Gründe für eine Segmentierung im Fahrzeugbau liegen daher vielfach in einer Reduzierung des Produktvolumens während der Fertigung und in einer möglichen parallelen und verteilten Fertigung der einzelnen Segmente [HAM92, HAM97].

### **5.2.1 Modularisierung im Busbau**

Busse besitzen einen vergleichbaren Aufbau der Struktur wie Wagenkästen von Schienenfahrzeugen. Sie werden größtenteils in Stahl-Differentialbauweise ausgeführt, wobei die Modulbildung hier in die Module Bodengruppe, Seitenwände, Dach und Fahrzeugabschluss erfolgt und nur zum Teil eine Komplettierung der Module

vorsieht (Bild 40). Die Verkleidung der Fahrzeugstruktur erfolgt mit Blechen oder Kunststoff-Komponenten [RÖS88].



**Bild 40** Differentialbauweise und Modulbildung eines Fahrzeugrahmens für einen Reisebus [BRE97, HAM92]

Die Motivation der Modularisierung der Fahrzeugstruktur im Busbau ist vorwiegend in drei Aspekten zu sehen:

- Parallelisierung der Fertigung für die einzelnen Strukturmodule und damit Verkürzung der Durchlaufzeit,
- Verkleinerung der Transporteinheiten und Vereinfachung der logistischen Abläufe,
- Fahrzeugkonfiguration durch Austausch einzelner, standardisierter Module (vorwiegend Seitenwand und Untergestell) zur Variation und kundenspezifischen Anpassung des Fahrzeugdesigns und der Fahrzeughöhe. Durch die Standardisierung der Module kann die Teilevielfalt erheblich reduziert werden.

Busse besitzen einen hohen Individualisierungsgrad, da die einzelnen Busunternehmen in Abhängigkeit des Einsatzprofils der Fahrzeuge eine auftragsspezifische Gestaltung ihrer Fahrzeuge fordern. So verfügt ein Bus, der vorwiegend als Linienbus und für Städtetouren eingesetzt wird, über ein deutlich reduzierteres Gepäckabteil jedoch um eine größere geforderte Stehhöhe im Vergleich zu einem Reise- bzw. Überlandbus. Darüber hinaus unterscheiden sich Busse, vergleichbar zu Schienenfahrzeugen, durch ihre Flurhöhe, auch hier wird zwischen 100%- und teilniederflurigen Bauweisen und konventionellen Hochflurbauweisen unterschieden. Bild 41 zeigt exemplarisch zwei Querschnittsvarianten eines Reisebusses.

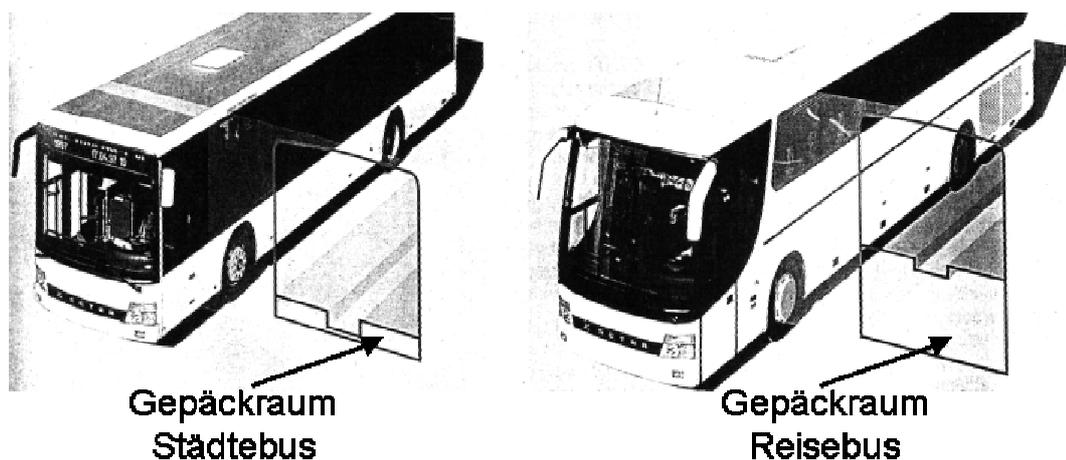
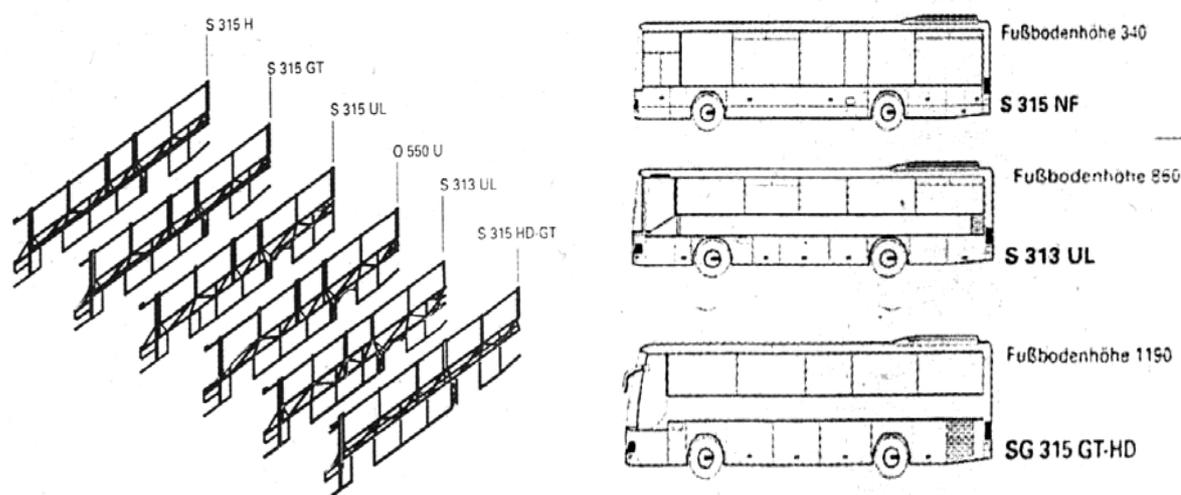


Bild 41 Struktureinfluss der Flurhöhen bei Reisebussen [SETRA GmbH]

Diese genannten Varianten betreffen in hohem Maße die Fahrzeugstruktur. Um die Vielfalt der Varianten und die daraus resultierenden Kosten für den Hersteller zu begrenzen, und um weiterhin eine Verkürzung der Fertigungszeiten zu erzielen, werden Busse zunehmend als Baukastenprodukt aus Struktur-Modulen konfiguriert. Dabei werden die Strukturmodule auftragsentkoppelt vorgefertigt und das Fahrzeug bei Auftragseingang aus verschiedenen Modulen konfiguriert. Bild 42 zeigt die entsprechenden Varianten von standardisierten Seitenwandmodulen für verschiedene Reisebus-Typen. An der Außenhaut des Fahrzeuges erfolgt die Angleichung an die verschiedenen Fahrzeughöhen über entsprechende Breiten des vom Coil abgerollten Bleches.



**Bild 42** Anbieterspezifische Varianten von Seitenwandmodulen und abgeleitete Produktvarianten eines Reisebusses [BRE97]

Erste Modulbauweisen im Busbau erfolgten bereits in den 70er Jahren, wobei sich die Modulbildung primär auf nicht zur Fahrzeugstruktur gehörende Komponenten, wie Klimaanlage, Motoren, Getriebe, Fahrwerkskomponenten, Toiletten- und Küchenmodule sowie weitere Komfortkomponenten, beschränkte. Die Modularisierung auch auf den Wagenkasten und damit die Fahrzeugstruktur zu erweitern, wurde konsequent erst Ende der neunziger Jahre umgesetzt.

Die Modularisierung bei Bussen setzt sich über die Fahrzeugstruktur hinaus fort und beinhaltet weiterhin Komponenten wie Fenster, Türen, Klappen und Komponenten des Antriebs, Fahrwerks und des Innenraums. Durch die konsequente Modularisierung der Fahrzeuge und die weitgehende Standardisierung und Mehrfachnutzung von Standardmodulen in der Fahrzeugstruktur und in den weiteren aufgeführten Bereichen konnten im Busbau Reduzierungen der genutzten Teilezahl für bestimmte Baureihen von über 40% erreicht werden. Weiterhin konnte bei einem modular aufgebauten Omnibus die Durchlaufzeit in der Endmontage von 1040 auf 810 Stunden im Vergleich zu einem herkömmlich aufgebauten Bus verkürzt werden. Das vorgestellte Modulkonzept erlaubt es, aufbauend auf einem Basismodell die drei Grundtypen *Überland*, *hochgelegter Boden* und *komfortabler Reisebus* zu fertigen. Zusätzlich wurde bei dieser Entwicklung die Zahl der Einzelteile ebenfalls um 40% und die erforderlichen Investitionen in Fertigungseinrichtungen um zwei Drittel reduziert [HAM97].

Bild 43 zeigt die erreichte Reduzierung der Teilstämme im Busbau bei einer konsequenten Umsetzung der Modulbauweise im Vergleich zur konventionellen Bauweise. Durch das vorgestellte Modularisierungskonzept konnte bei Verminderung der Teilstämme sogar die Variantenvielfalt des Modulkonzeptes erhöht werden.

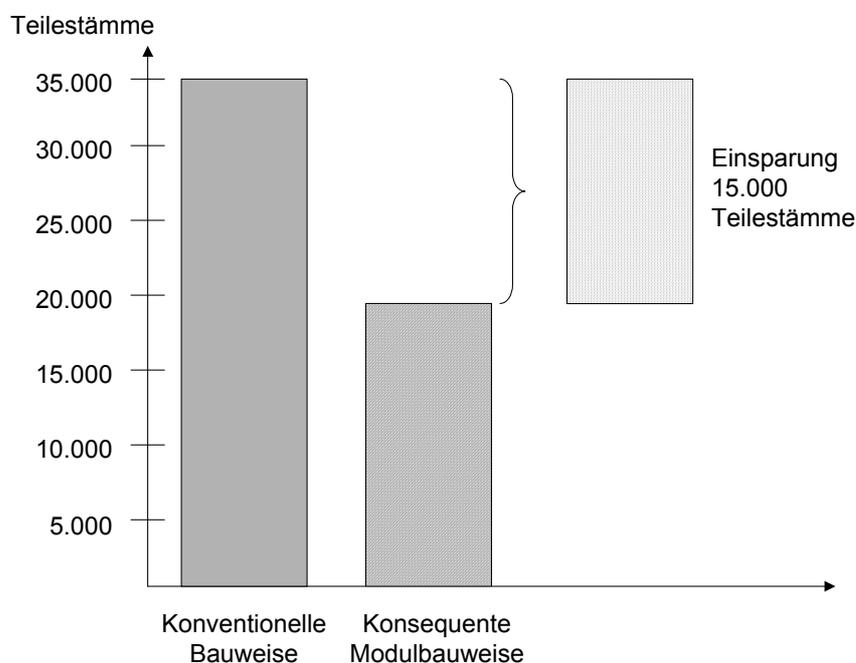


Bild 43 Vergleich der Teilespektren bei konventioneller und modularer Bauweise im Busbau [HAM97]

### 5.3 Umsetzung von Modulbauweisen für das Variantenmanagement von Wagenkästen

Die in Kapitel 5.1.2.2 beschriebene Standardisierungsstrategie auf Modulebene, deren Umsetzung im vorangegangenen Kapitel bei Bussen und Flugzeugen exemplarisch dargestellt wurde, ist nun mit Hinblick auf die Bildung von kundenspezifischen Strukturvarianten auf den Waggonbau zu übertragen und auf ihre Wirkung hin zu überprüfen. Dies setzt eine modulare Produktstruktur des Wagenkastens voraus, die über bisher umgesetzte Konzepte (siehe Kapitel 3.1.4) hinausgeht, um eine möglichst hohe Flexibilität des Konzeptes hinsichtlich Produktausprägung und Prozesseinsatz zu gewährleisten.

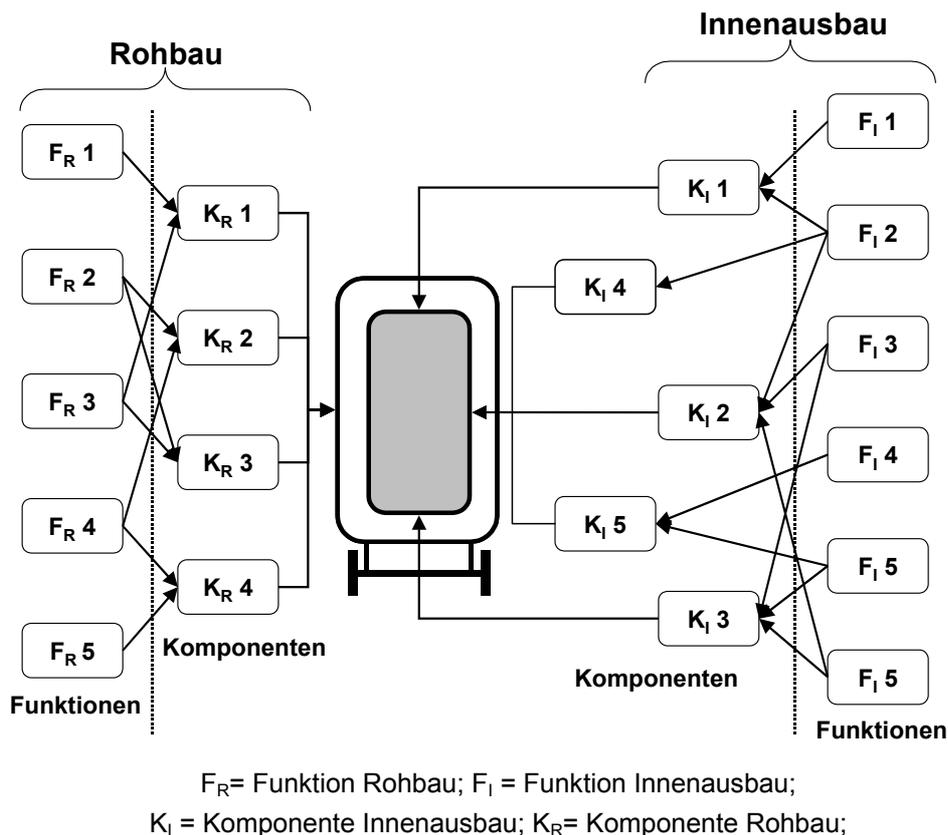
Nachfolgend werden ausgehend von den theoretischen Definitionen verschiedene Konzepte einer Modularisierung des Wagenkastens vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für ein Variantenmanagement im Wagenkastenbau bewertet.

Ziel der zu erarbeitenden Lösung ist es, ein modulares Konzept für den Wagenkasten zu entwickeln, das zum einen die flexible Bildung kundenspezifischer Fahrzeuge aus weitgehend standardisierten Modulen ermöglicht und zum anderen die Defizite der Schienenfahrzeugproduktion aus Kapitel 3.4 durch eine Verbesserung von Produkt- und zugehöriger Prozessstruktur reduziert.

### 5.3.1 Erarbeitung modularer Konzepte des Wagenkastens

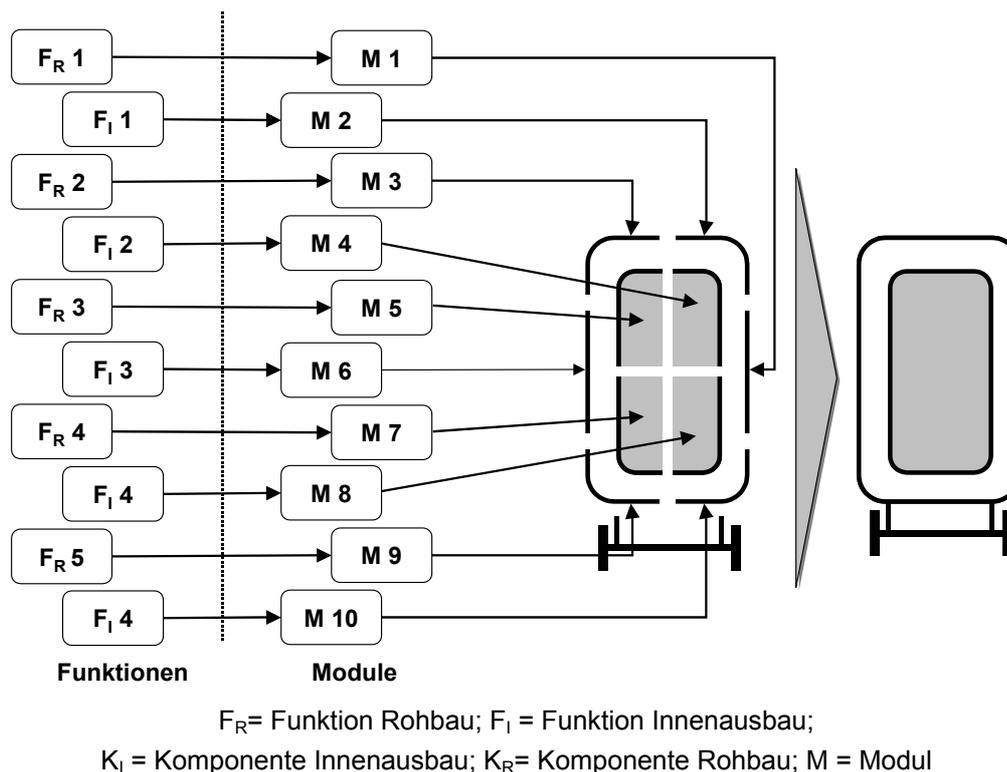
In Abgrenzung zu den theoretischen Definitionen des Begriffs Modularität in Kapitel 5.1.1.1 ist in der praktischen Umsetzung auf den Wagenkastenbau festzustellen, dass ein höchstmöglicher Modularisierungsgrad, eine größtmögliche physische und funktionale Unabhängigkeit der einzelnen Module sowie eine 1:1-Relation zwischen Funktion und Bauteil, keinen geeigneten Ansatz darstellt (Bild 45). Ein derartig modulares Konzept steht dem Ziel einer vereinfachten Variantenbildung durch eine vereinfachte Produktstruktur entgegen. Vielmehr sind die Vorteile einer modularen Bauweise insbesondere in der Fertigung und Montage durch eine mögliche Parallelisierung der Modulfertigung, eine verbesserte Montagezugänglichkeit, die Aufhebung der Trennung und seriellen Fertigung zwischen Rohbau und Innenausbau sowie eine hohe Integration von Funktionen und zugehörigen Funktionsträgern in die jeweiligen Module zu nutzen. Dies führt zur Bildung von umfangreichen Modulen, die eine hohe innere, d.h. modulbezogene physische und funktionale Abhängigkeit aufweisen. In Relation zu der gewünschten Flexibilität des modularen Konzeptes, den funktionalen Randbedingungen und produktionstechnischen Aspekten ist zu entscheiden, wie die Module zu bilden und wie viele und welche Funktionen in die einzelnen Module zu integrieren sind. Hierauf wird nachfolgend noch eingegangen.

Die Bilder Bild 44 bis Bild 46 zeigen schematisch den Vergleich zwischen *konventioneller* Bauweise, einer *konsequenten* Umsetzung des theoretischen Modulansatzes und dem prinzipiellen Relationsschema zwischen Funktion, Bauteil und Modul eines *geeigneten* Modulkonzeptes.



**Bild 44** Schematische Schienenfahrzeugstruktur in konventioneller Bauweise

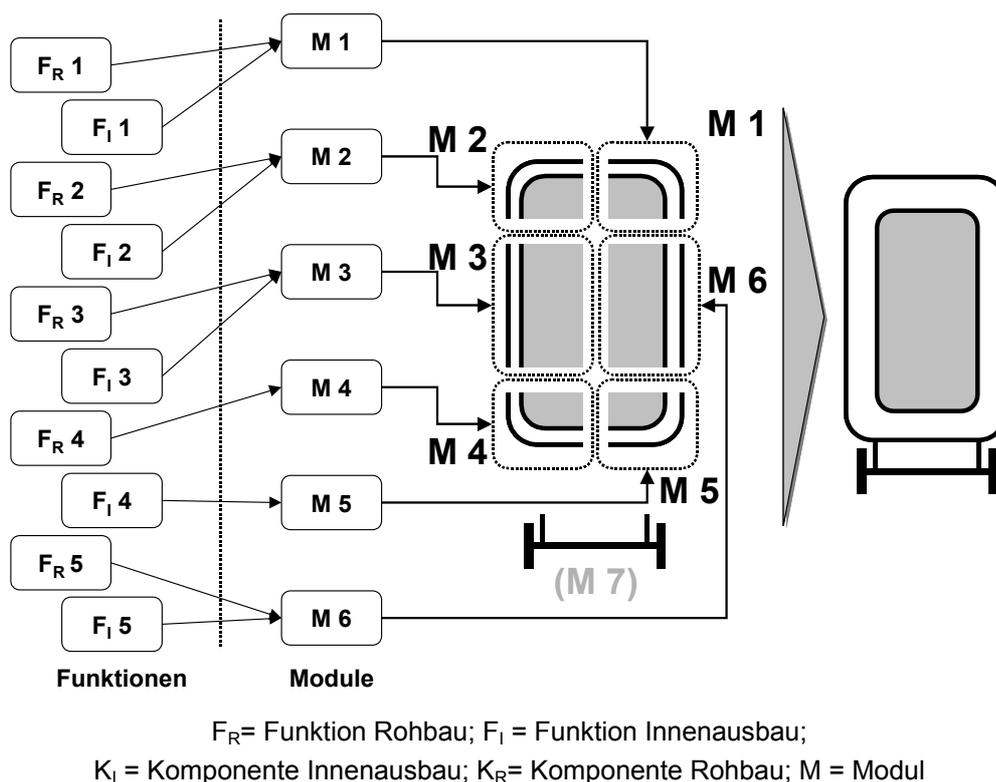
Konventionelle Bauweisen von Schienenfahrzeugen, wie sie in Kapitel 3.1 beschrieben sind, weisen festgelegten Funktionen bestimmte Komponenten zu. Hierbei ist die Beziehung zwischen Funktion und Komponente  $n:m$ , d.h. eine Funktion kann über mehrere Komponenten erfüllt werden, und eine Komponente kann auch mehrere Funktionen erfüllen (Bild 44). Es besteht jedoch stets eine klare Trennung zwischen den Funktionen und Komponenten des Rohbaus und des Innenausbaus. Daraus ergibt sich eine sequentielle Fertigung des Fahrzeugs in Rohbaufertigung mit anschließendem Innenausbau.



**Bild 45** Schematische Schienenfahrzeugstruktur in streng modularer Bauweise

Wird eine Relation zwischen Funktionen und Komponenten von 1:1 angestrebt, so entsteht eine vollständige funktionale Unabhängigkeit der einzelnen Komponenten. Sind diese Komponenten ebenfalls physisch unabhängig, also leicht trennbar, so kann nach der Definition von GÖPFERT aus [Bild 34](#) von einem höchstmöglichen Grad der Modularität gesprochen werden. Diese hochmodulare Produktstruktur ([Bild 45](#)) erscheint jedoch aus mehreren Gründen für wenig geeignet:

- Jeder Funktion ist ein Modul zugewiesen; hieraus resultiert eine sehr hohe Anzahl an Modulen und zugehörigen Schnittstellen mit entsprechend hohem Montageaufwand für die Erstellung des Gesamtprodukts;
- durch die hohe Anzahl an Schnittstellen erhöht sich der Aufwand für die Entwicklung und Fertigung der Module, da jedes Modul mit seinen Fügepartnern über geeignete, kompatible Schnittstellen verfügen muss; weiterhin steigt die Gefahr der Inkompatibilität der Module durch toleranzbedingte Abweichungen;
- zusätzliche geforderte Funktionen erfordern zusätzliche Module, für deren Integration in das Gesamtprodukt „offene“ Schnittstellen vorhanden sein müssen. Die im Vorfeld berücksichtigte Anzahl an „offenen“ Schnittstellen begrenzt die Anzahl der zusätzlich umzusetzenden Funktionen.



**Bild 46** Schematische Schienenfahrzeugstruktur in geeigneter modularer Bauweise

Eine geeignete Form der Modularisierung wird mehrere Funktionen in bestimmte Module integrieren (Bild 46). Dabei ist zu vermeiden, eine Funktion über mehrere Module zu verteilen, um bei einer gewünschten Änderung einer Funktion nur das entsprechende Modul auswechseln zu müssen. Wie viele und welche Funktionen in einem Modul zusammengefasst werden, und welche dieser Module variabel und nicht variabel sind, richtet sich unter anderem nach dem geforderten Flexibilitätsgrad des Produktes, den technologischen Abhängigkeiten von Funktionen, Aspekten der Funktionalität und der Produktion sowie der Clusterung von Kundenwünschen sowie der kundenspezifischen Wahrnehmung von Veränderungen.

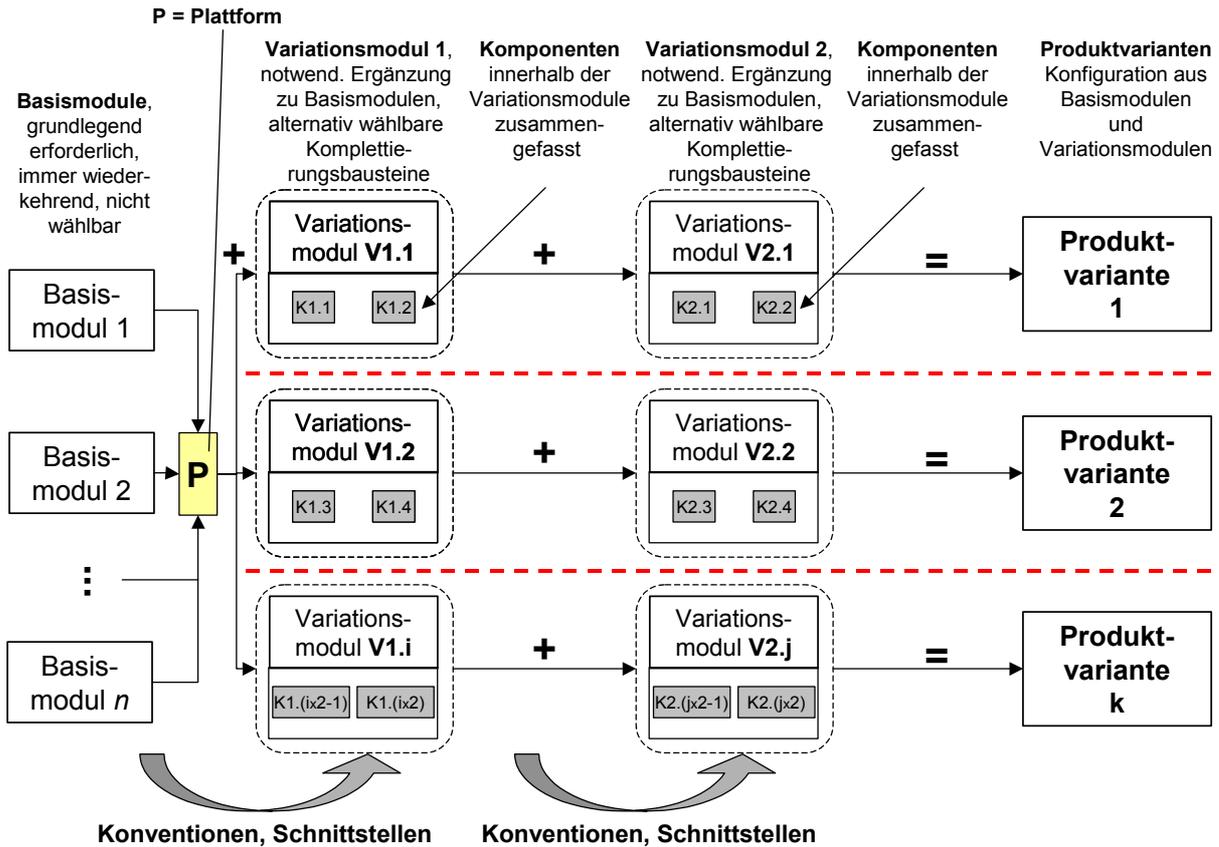
*Fixe Basismodule* können dabei Funktionen zusammenfassen, für die keine Variationsanforderungen vom Kunden bestehen, die der Kunde nicht explizit wahrnimmt oder für die der Hersteller keine Varianten anbietet, weil seine eingesetzten Fertigungsprozesse beispielsweise keine Variantenbildung ermöglichen. Diese Module bilden die Produktplattform. Anbieterseitig definierte *Variationsmodule* fassen dagegen die gängigen Variationsanforderungen möglichst weitgehend in sich zusammen. Bei entsprechender Marktnachfrage kann das Produkt unter Beibehaltung der fixen Basismodule den Kundenwünschen durch Austausch der Variationsmodule ange-

passt werden. So kann es entsprechend Bild 46 als sinnvoll erachtet werden, die Funktionen,  $F_{R1}$ ,  $F_{I1}$ ,  $F_{R2}$  und  $F_{I2}$  zu einem Variationsmodul  $M_{1,2}$  zusammenzufassen, wenn beispielsweise die Variation der Dachgeometrie in Verbindung mit einem angepassten Innenausbau im Dachbereich ein häufig nachgefragter Kundenwunsch ist.

### 5.3.2 Eigenschaften und Defizite von Modul- und Plattformkonzepten

Die Bildung einer geeigneten Unterteilung des Wagenkastens in *Basis-* und *Variationsmodule* erscheint unter Berücksichtigung der beschriebenen heterogenen Anforderungen an die Wagenkastengeometrie aus Kapitel 2.2.1 als komplexe Aufgabe. Der Hersteller bietet durch die Bildung von Basis- und Variationsmodulen stets ein geschlossenes Bauprogramm an, dessen Umfang und Struktur die Flexibilität des Gesamtkonzeptes anbieterseitig bestimmt [PAH97, SEL00]. Der Anteil der Basismodule determiniert dabei zum einen den Standardisierungsgrad des Plattformkonzeptes und damit die wirtschaftlichen Einsparungseffekte durch eine Mehrfachverwendung von Modulen und zugehörigen Prozessen. Zum anderen wird hierdurch die Flexibilität des Plattformkonzeptes begrenzt.

Die Aufgabe für den Hersteller besteht demnach darin, stets nach einem geeigneten Verhältnis zwischen hinreichender Flexibilität und größtmöglicher Standardisierung zu suchen. Es ist hierbei zu entscheiden, welche Größe, d.h. welche Anzahl an zu kombinierenden und alternativ einzusetzenden Variationsmodulen das Plattformkonzept aufweist, und wie das Verhältnis von Basis- zu Variationsmodulen ist. Die hierfür möglichen Alternativen zeigen die Bilder Bild 47 bis Bild 52:



n = Anzahl Basismodule;  
 i = Anzahl der Alternativen des Variationsmoduls 1;  
 j = Anzahl der Alternativen des Variationsmoduls 2;  
 k = Anzahl möglicher Produktausprägungen des Plattformkonzeptes  
 K = in Variationsmodulen zusammengefasste Komponenten

**Bild 47** Konventionelles Plattformkonzept mit *n*-Basismodulen und zwei Variationsmodulen mit *i* bzw. *j* Alternativen

Ein konventionelles Plattformkonzept fasst entsprechend Kapitel 5.1.1.1 bestimmte Komponenten, Prozesse, Organisations- oder Wissensformen, für die keine Varianten vorgesehen sind, in einem oder mehreren Basismodulen zusammen. Hierdurch wird die Plattform des Fahrzeugs gebildet. Vereinfachend wird hier angenommen, dass für die Umsetzung eines Plattformkonzeptes im Wagenkasten insbesondere physische Komponenten und dazugehörige Produktionsprozesse vereinheitlicht werden.

Die Plattform eines Wagenkastens könnte beispielsweise aus einem standardisierten Dach, dem Untergestell und der Bodenwanne des Fahrzeugs bestehen. Die Variationsmodule können in diesem Beispiel durch eine definierte Anzahl von Fahrzeugköpfen, verschiedenen Seitenwänden, Tür- und Fenstervarianten sowie von

köpfen, verschiedenen Seitenwänden, Tür- und Fenstervarianten sowie von Varianten des Innenausbau gebildet werden.

Üblicherweise sind Plattformkonzepte derart gestaltet, dass die Plattform den größeren Anteil des Produktes bezogen auf den materiellen Produktwert sowie auf die Entwicklungs- und Fertigungsaufwände im Verhältnis zu den Anteilen der Variationsmodule bildet. Als Orientierung zum Umfang einer Plattform kann ein Wert aus der Automobilindustrie übernommen werden: Hier bilden Fahrzeugplattformen etwa 60% des Wert- und Engineeringanteils des Fahrzeugs [WßN99]. Hierdurch können Kosteneinsparungen durch Mengenvorteile (*economies of scale*) in Folge einer Mehrfachnutzung der Plattform in Produktvarianten sowie Einsparungen in der Konstruktion und Produktionsvorbereitung erzielt werden.

Zwischen den Basis- und den Variationsmodulen bestehen definierte Schnittstellen und Konventionen, die bauliche und funktionale Restriktionen berücksichtigen. Durch derartige Konventionen werden Unverträglichkeiten bestimmter Kombinationen im Vorfeld ausgeschlossen. Weiteres Ziel eines derartigen Plattformkonzeptes ist es, neben der Reduzierung der Variantenvielfalt, der Nutzung von Mengenvorteilen und der Standardisierung von Prozessen, weitgehend auftragsunabhängig die Module des Plattformkonzeptes vorzufertigen. Bei Auftragseingang wird das Fahrzeug dann aus den bestehenden Modulen konfiguriert. Der Entwicklungs- und Fertigungsaufwand der Module wird damit vom eigentlichen Kundenauftrag entkoppelt und die Durchlaufzeit verkürzt.

Ein Plattformkonzept, wie es in Bild 47 dargestellt ist, besitzt vom Hersteller definierte Grenzen: Die Umsetzung kundenspezifischer Varianten, die nicht aus der Kombination von Basis- und Variationsmodulen des Plattformkonzeptes gebildet werden können, sind nicht vorgesehen oder werden nur durch erhebliche Kostenzuschläge für den Kunden berücksichtigt [FEL99]. Das Plattformkonzept definiert damit die Anzahl der Varianten und bedient einen definierten Markt. Im Idealfall, d.h. bei einer uneingeschränkten Kombinatorik der einzelnen Variationsmodule untereinander mit den Basismodulen, ergibt sich für ein Plattformkonzept eine definierte theoretische Variantenvielfalt  $V$ . Diese wird mathematisch beschreiben durch folgende Formel:

$$V = \prod_{i=1}^{i=k} n_i \quad (1)$$

wobei  $k = \text{Anzahl der Variationsmodule}$  und  $n = \text{Anzahl der Varianten pro Variationsmodul}$  ist.

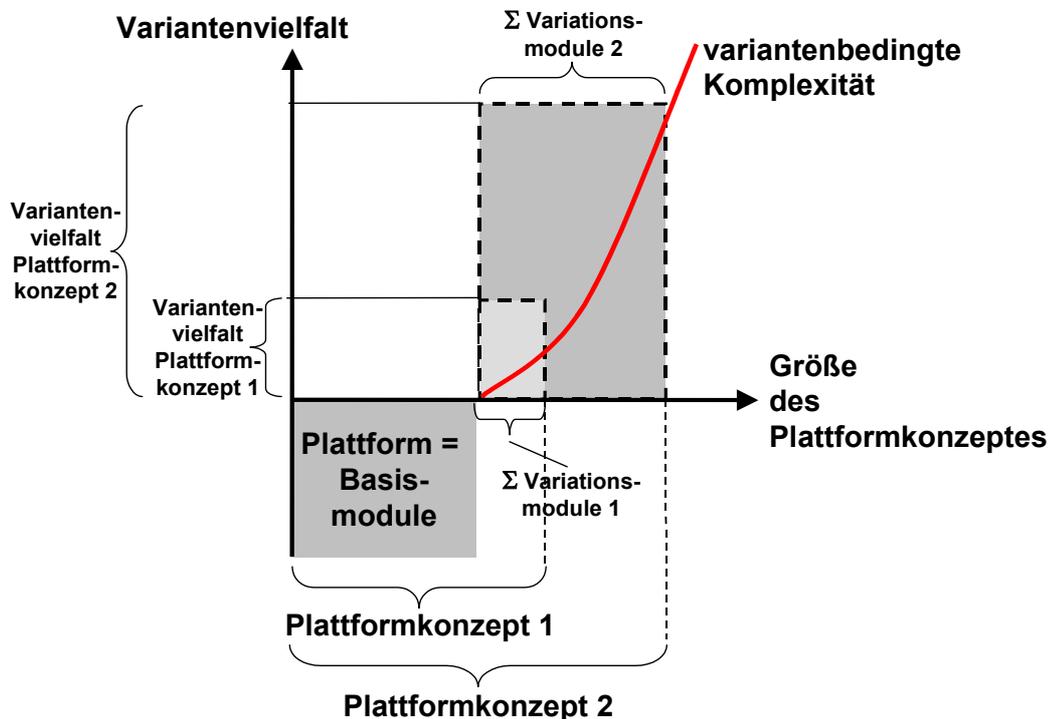
Ist die Anzahl der Varianten in allen Variationsmodulen gleich, so vereinfacht sich die Formel zu:

$$V = n^k \tag{2}$$

wobei  $k = \text{Anzahl der Variationsmodule}$  und  $n = \text{Anzahl der Varianten pro Variationsmodul}$  ist.

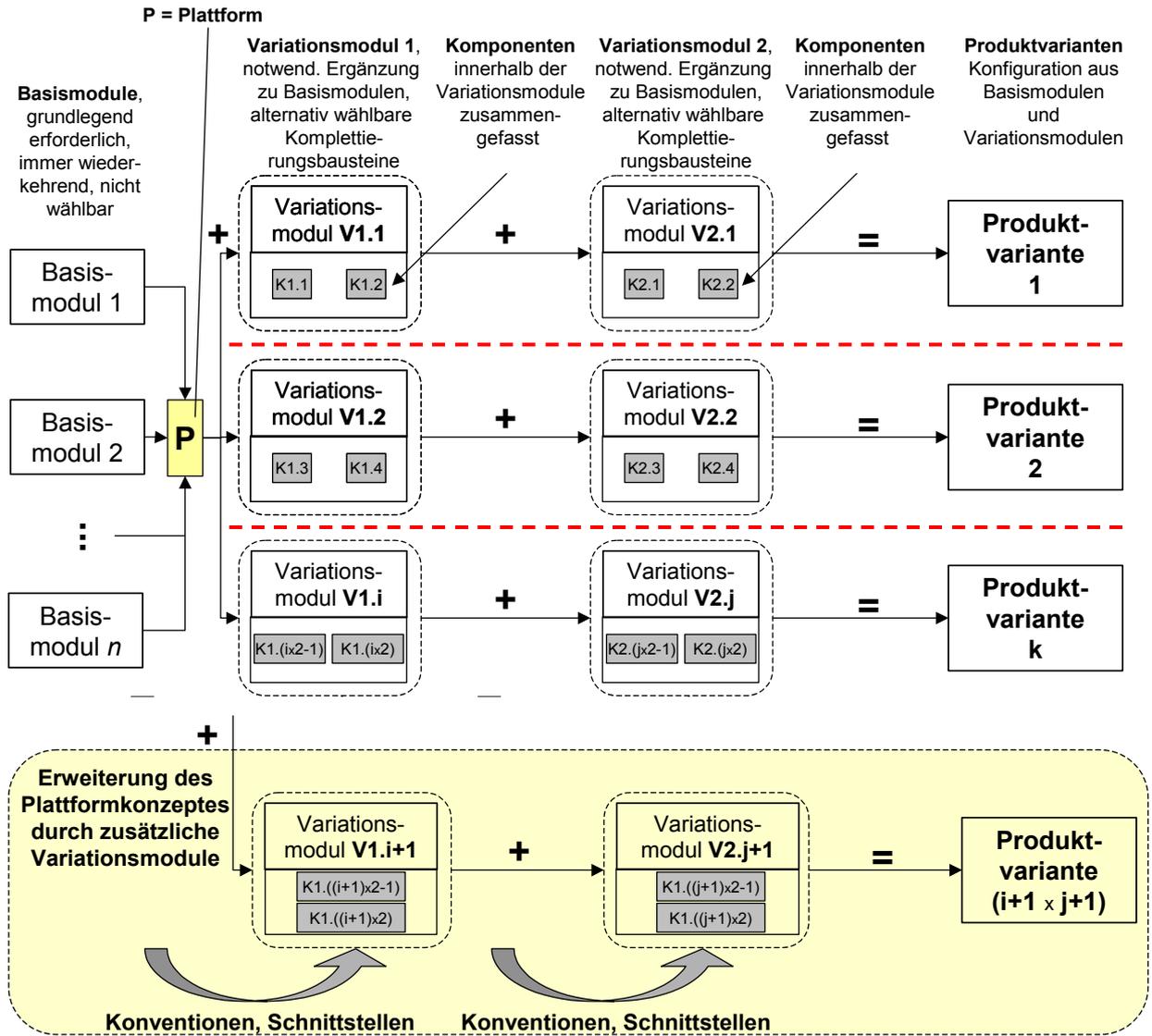
*Beispiel: Für ein Produkt, das aus  $n$  Basismodulen ( $B$ ) und 3 erforderlichen Variationsmodulen ( $V1, V2, V3$ ) besteht, es für  $V1 = 4$  Varianten, für  $V2 = 6$  Varianten und für  $V3 = 2$  Varianten gibt, ergibt sich eine Variantenvielfalt von:  $4 \times 6 \times 2 = 48$  theoretische Varianten, wenn sich keine Kombinationen gegenseitig ausschließen.*

Die Komplexität eines Plattformkonzeptes steigt dabei überproportional zur möglichen Variantenanzahl in Folge des mit der Anzahl der Variationsmodule höher werdenden Aufwands des Variantenmanagements (Bild 48). Weiterhin führen viele Variationsmodule zu einer höheren Wahrscheinlichkeit von Unverträglichkeiten. Damit nimmt die Wirtschaftlichkeit eines Plattformkonzeptes mit steigender Anzahl von Variationsmodulen ab [QUE95, ROB98].



**Bild 48** Relation zwischen Größe des Plattformkonzeptes, Variantenvielfalt und Komplexität

Der Erfolg eines derartigen Konzeptes hängt von der Umsetzung der Marktforderungen in die entsprechenden Module ab. Recherchen im Vorfeld der Bildung des Plattformkonzeptes müssen zu einer geeigneten Produktstruktur führen, die variierende Anforderung in Variationsmodule umsetzt und aus nicht variierenden Anforderungen die Bestandteile der Plattform bildet. Ein derartiges Plattformkonzeptes kann bei entsprechendem Bedarf um zusätzliche Variationsmodule erweitert werden. Dies führt zu einem vergrößerten Plattformkonzept mit erweiterten Grenzen (Bild 49).



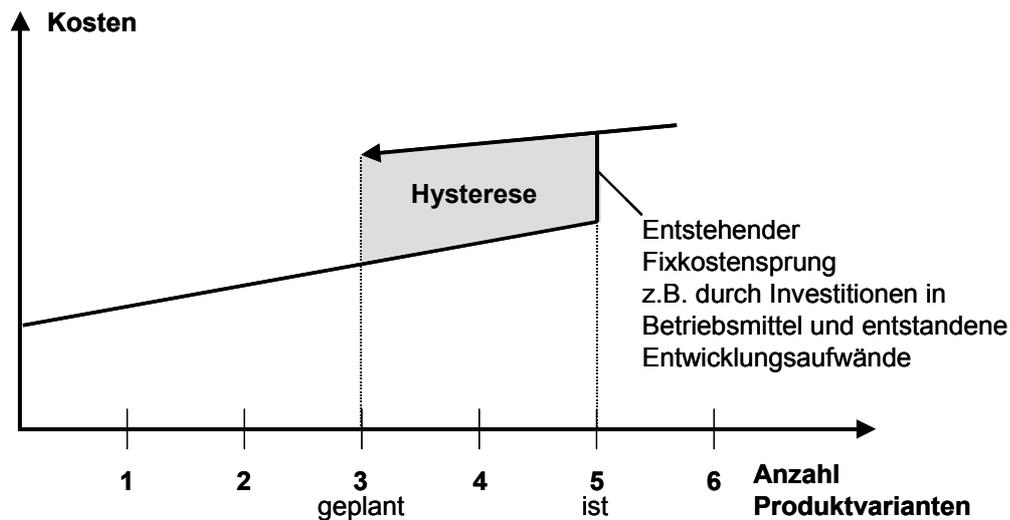
- n = Anzahl Basismodule;
- i = Anzahl der Alternativen des Variationsmoduls 1;
- j = Anzahl der Alternativen des Variationsmoduls 2;
- k = Anzahl möglicher Produktausprägungen des Plattformkonzeptes
- K = in Variationsmodulen zusammengefasste Komponenten

**Bild 49** Erhöhung der Flexibilität durch zusätzliche Alternativen für die Variationsmodule

Die Umsetzung im Wagenkasten könnte beispielsweise durch die Aufnahme zusätzlicher Varianten des Fahrzeugkopfes, der Fenster und Türen sowie des Innenausbaus erfolgen. Die Struktur des Plattformkonzeptes und die Bestandteile der Plattform bleiben dabei unverändert, die zusätzlichen Variationsmodule weisen ebenfalls definierte Schnittstellen auf und die Variantenbildung berücksichtigt weiterhin festgelegte Konventionen.

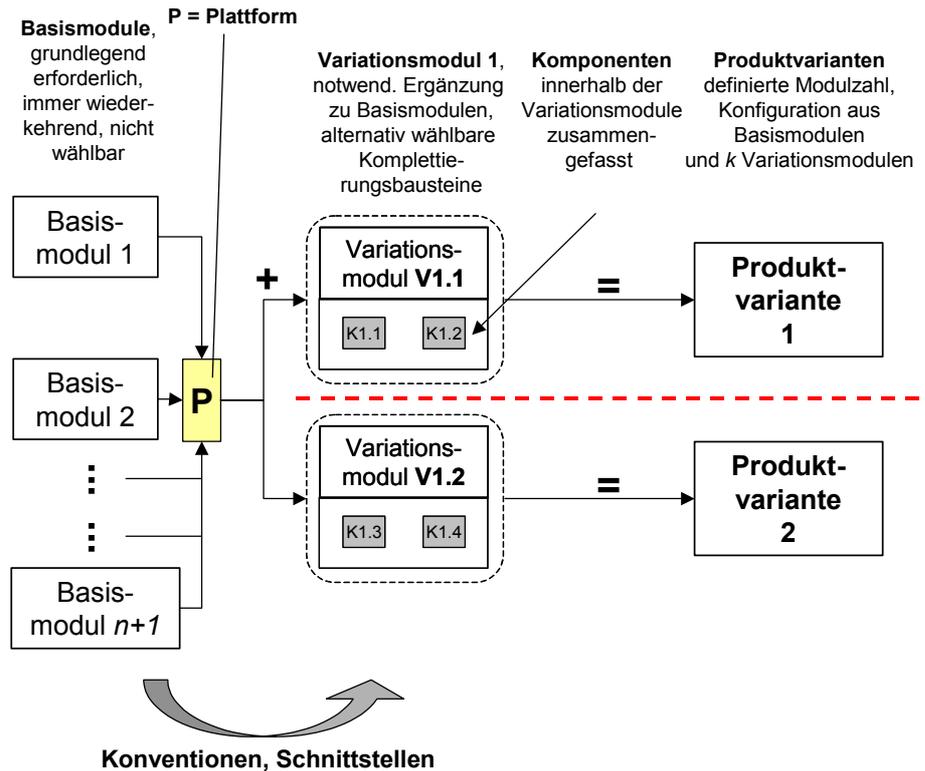
Der Nachteil einer Erweiterung der Plattformgrenzen besteht in der weiter steigenden überproportionalen Zunahme der Komplexität durch eine entsprechende Erhöhung der zu verwaltenden Variantenvielfalt (siehe Bild 48). Weiterhin steigt die Gefahr der Unverträglichkeit einzelner Kombinationen auf der Gesamtfahrzeugebene. Die Erstellung und Berücksichtigung entsprechender Konventionen gewinnt bei zunehmender Größe des Plattformkonzeptes an Bedeutung. Die Möglichkeit der auftragsunabhängigen Produktion der Bestandteile der Plattform sinkt mit der Erweiterung der Plattformgrenzen, da eine Vorhaltung aller möglichen Variationsmodule zu einer überhöhten Kapitalbindung und logistischen Problemen führt. Die Vorteile des Plattformkonzeptes reduzieren sich mit wachsender Anzahl der Variationsmodule auf die Mehrfachverwendung der Basismodule.

Ein Plattformkonzept mit einer großen Anzahl von alternativen Variationsmodulen setzt eine entsprechende Nachfrage der jeweiligen Varianten des Konzeptes voraus. Zusätzliche entstehende Entwicklungsaufwände, Fixkosten durch z.B. variantenspezifische Betriebsmittel und steigende komplexitätsbedingte Aufwendungen innerhalb des Variantenmanagements und der Logistik sind durch einen entsprechenden Absatz der zusätzlichen Varianten auszugleichen. Angestrebte weitere Skalenvorteile bei Materialien und Komponenten sowie höhere Betriebsmittelauslastung und zusätzliche Kundenanfragen können zu der Entwicklung weiterer Varianten durch neue Variationsmodule führen, da Kosten erst dann auf die Variantenerhöhung zurückgeführt werden, wenn sie neue Investitionen hervorrufen. Dies führt vielfach zu ungenauen Aussagen über die Kostenverursachung einzelner Varianten bzw. Variationsmodule. Bei einem späteren Abbau von Varianten lassen sich jedoch die entstandenen Kosten nicht vollständig wieder zurückbilden. *BARTUSCHAT* bezeichnet dies als variantenbedingten *Kostenhystereseeffekt* (Bild 50). Zusammenfassend kann demnach eine kontinuierliche Weiterentwicklung zusätzlicher Varianten durch zusätzliche Alternativen für die Variationsmodule in einem Plattformkonzept nicht als wirtschaftlich angesehen werden.



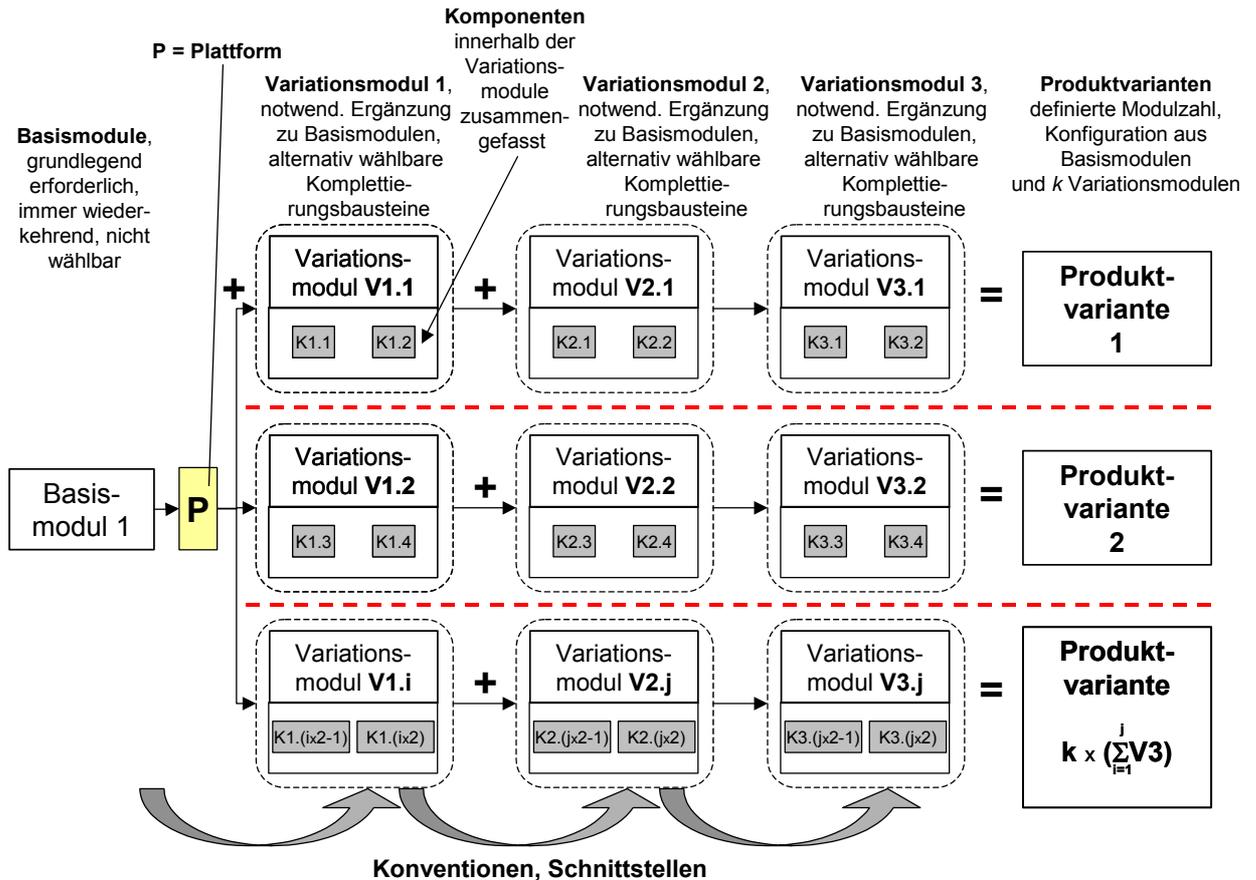
**Bild 50** Kostenhystereseeffekt beim Abbau späterer zusätzlicher Varianten [BAR95]

Im Schienenfahrzeugmarkt wird eine Fahrzeugvariante in nur kleinen Stückzahlen abgesetzt (s. [Bild 5](#)). Aus diesem Grund wird versucht, den Anteil variantenspezifischer Betriebsmittel, Materialien und Konstruktionsaufwendungen möglichst gering zu halten. Dies gelingt, wenn der Anteil der Plattform, d.h. der invariablen Module, möglichst groß gehalten wird. Es wird dann von einer *großen* Plattform gesprochen. So kann z.B. die gesamte Tragstruktur des Fahrzeugs einschließlich der Innenverkleidung als Basismodul betrachtet werden. Sie bleibt für alle geplanten Ausführungsvarianten unverändert. Die Variationsmodule beinhalten dann beispielsweise Ausrüstungskomponenten, Innenausstattungsmodule oder verschiedene Fahrzeugkopfvvarianten. Das gesamte Plattformkonzept ist in seiner Flexibilität durch den hohen Umfang der Plattform stark eingeschränkt. Die Variationsmodule sind in der Regel weniger komplex gestaltet, d.h. ihr Umfang ist durch eine kleinere Anzahl an zusammengefassten Komponenten geringer ([Bild 51](#)) [INN00].



**Bild 51** Plattformkonzept mit reduzierter Komplexität durch hohen Anteil an Basismodulen und wenigen Alternativen für die Variationsmodule

Eine weitere Möglichkeit der Bildung eines Plattformkonzeptes im Wagenkastenbau besteht in der Gestaltung der Plattform nach dem „*kleinsten gemeinsamen Nenner*“ aller Anforderungen, d.h. es werden nur die Bereiche des Wagenkastens in der Plattform zusammengefasst, die nicht durch variierende Anforderungen betroffen sind. Hieraus resultiert die Bildung von Basismodulen sehr kleinen Umfangs, die in allen Wagenkastenvarianten genutzt werden. Dies können beispielsweise bestimmte Dach- oder Seitenwandbereiche sowie standardisierte einzelne Komponenten, wie Fenster oder Türen, sein. Die Variabilität des Plattformkonzeptes ist durch den kleinen Anteil der Plattform und den bedeutend höheren Anteil der Variationsmodule sehr hoch. Gleichfalls steigt jedoch die Komplexität des Konzeptes durch einen hohen Anteil an zu verwaltenden Variationsmodulen, zahlreichen Schnittstellen und zu berücksichtigenden baulichen Konventionen stark an (siehe [Bild 48](#)). Größere wirtschaftliche Mengenvorteile sind durch den kleinen Anteil der mehrfach genutzten Basismodule der Plattform kaum zu erzielen.



$n$  = Anzahl Basismodule;  
 $i$  = Anzahl der Alternativen des Variationsmoduls 1;  
 $j$  = Anzahl der Alternativen des Variationsmoduls 2;  
 $k$  = Anzahl möglicher Produktausprägungen des Plattformkonzeptes  
 $K$  = in Variationsmodulen zusammengefasste Komponenten

**Bild 52** Plattformkonzept mit hoher Flexibilität durch geringen Anteil an Basismodulen und erhöhten Anteil an Variationsmodulen

### 5.3.3 Bewertung der Konzepte und Ableitung eines Lösungskonzeptes

Als Instrument für das Variantenmanagement im Wagenkastenbau von Schienenfahrzeugen erscheint keines der aufgeführten Plattformkonzepte für geeignet, wenn einerseits ein hoher Anteil der Wagenkastenbestandteile standardisiert und die variantenbedingte Komplexität gesenkt, andererseits einer hohen kundenspezifischen Variantenbildung entsprochen werden soll.

Zusammengefasst führt die Bildung von konventionellen Plattformkonzepten mit fest definierten Plattformgrenzen und ausschließlich anbieterspezifischen Varianten bei einer Umsetzung im Wagenkastenbau zu folgenden Ausprägungsmöglichkeiten:

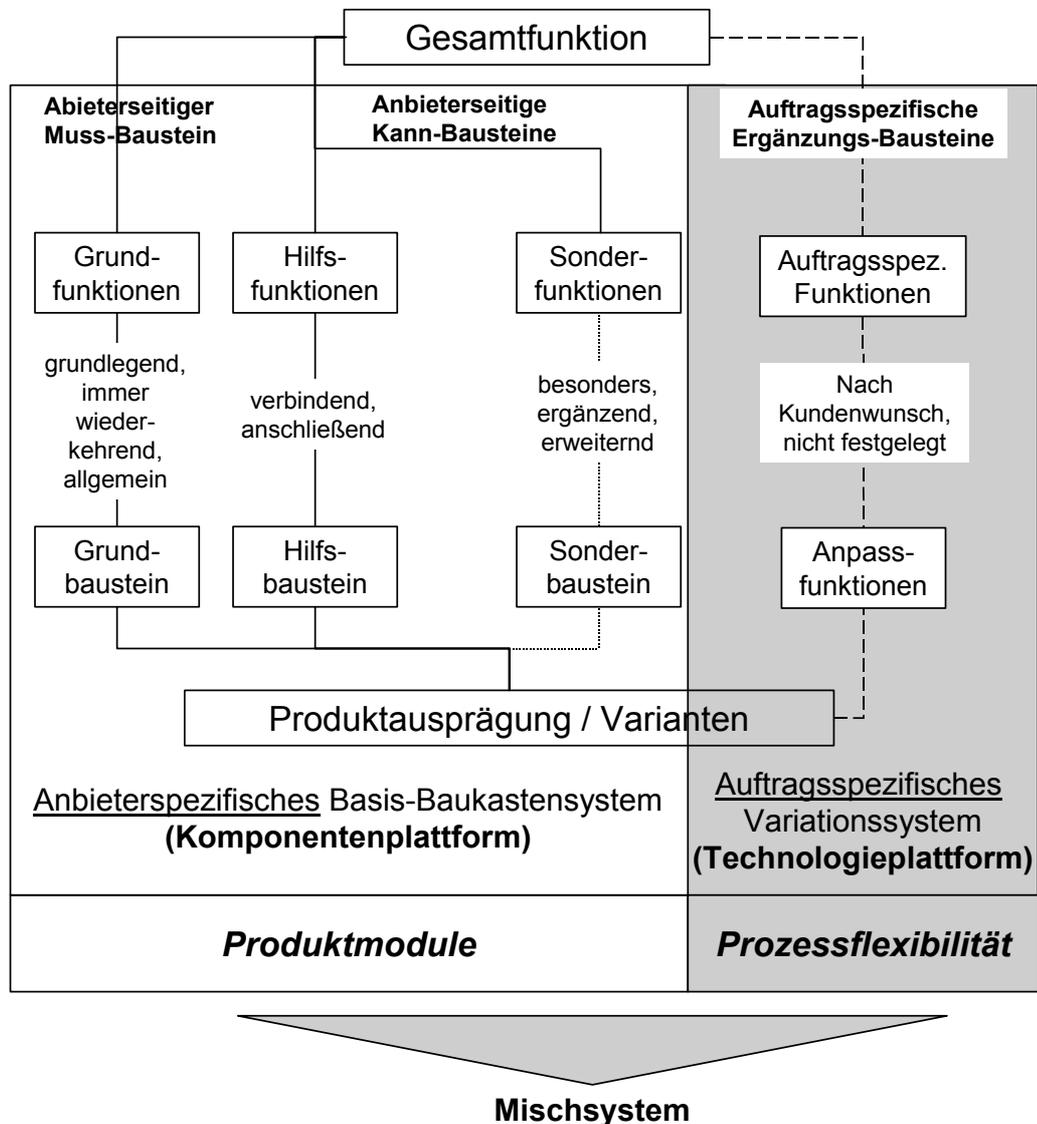
- Die Umsetzung eines wenig flexiblen Rohbaukonzeptes mit hohem Standardisierungsanteil, dessen Varianten sich durch Ausstattungsvarianten, Antriebsvarianten oder den Austausch einzelner Komponenten bilden lassen, oder
- die Umsetzung eines hochflexiblen Konzeptes mit geringem Standardisierungsanteil, das jedoch aufgrund der kleinen Stückzahlen und der heterogenen, kundenspezifischen Anforderungen die beschriebenen Skalenvorteile eines Plattformkonzeptes nur unzureichend nutzen kann.

Es wird an dieser Stelle die These aufgestellt, dass ein geeigneter Standardisierungsansatz für den Wagenkastenbau von Schienenfahrzeugen aufgrund der benannten Ausgangsbedingungen und der beschriebenen Eigenschaften von Plattformkonzepten keine der dargestellten Formen verfolgen kann. Ein geeigneter Lösungsansatz müsste die Vorteile einer großen Komponenten-Plattform, die über die umfangreiche Mehrfachverwendung von anbieterseitig vorgesehenen Variationsmodulen Skaleneffekte ermöglicht, mit denen einer flexiblen Technologieplattform, die über flexible Prozesse die wirtschaftliche Generierung auftragspezifischer Module ermöglicht, kombinieren.

Dies würde in der Umsetzung bedeuten, Bereiche der Wagenkastenstruktur, die nicht oder in nur geringem Maße von Variationsanforderungen betroffen sind, als fixe, auftragsunspezifische Basismodule zu definieren, für die anbieterspezifische Varianten angeboten werden können. Bereiche, die von Variationsanforderungen des Marktes in nicht vorhersehbarer Ausprägung betroffen sind, sind als Variationsmodule zu identifizieren, die kundenspezifisch durch den Einsatz flexibler Produktionstechniken in prozessabhängigen Grenzen variiert werden können. Aufgrund der geometrischen und funktionalen Flexibilität dieser Variationsbereiche, können diese als "free-to-design-Bereiche" bezeichnet werden [SEL00]. Dieses Konzept kombiniert über die Nutzung von standardisierten Modulen des Wagenkastens als *Komponentenplattform* und den Einsatz von standardisierten und über Parameter steuerbaren Prozessabläufen als *Prozessplattform* die Standardisierungsebenen 2 und 4 eines Plattformkonzeptes aus [Bild 38](#). Es bietet Möglichkeiten für eine verstetigte Fertigung von auftragspezifischen Unikaten.

Dieser Ansatz weicht von bisher umgesetzten Plattformkonzepten dahingehend ab, dass keine festen Plattformgrenzen, d.h. keine anbieterseitig festgelegte Variantenvielfalt durch entsprechend festgelegte Variationsmodule, existieren [FEL99]. Die Ausprägungen der Produkte sind im Vorfeld nicht festgelegt. Das Produkt besteht stets aus den anbieterseitig definierten Basismodulen, für die vom Hersteller definierte Varianten vorgesehen werden können, und den in hohem Umfang geometrisch

und funktional variablen kundenspezifischen Variationsbereichen. Diese Kombination ermöglicht die Generierung von Produkten mit weitgehend kundenspezifischer Ausprägung. In Anlehnung an PAHL/BEITZ entsteht durch die Kombination von alternativen, anbieterspezifischen Modulen (*Basismodule*) und auftragsspezifischen Modulen (*Variationsmodule*) ein sogenanntes *Mischsystem* (Bild 53).



**Bild 53** Wagenkasten als Mischsystem durch Kombination von anbieterseitig definierten Produktmodulen und flexiblen Prozessen [PAH97, verändert]

Das dargestellte Mischsystem setzt sich zusammen aus dem anbieterspezifischen Basis-Baukastensystem, bestehend aus den Basismodulen und optional einzusetzenden, aber in ihrer Ausprägung vom Hersteller fest definierten Sondermodulen,

sowie dem auftragsspezifischen Variationssystem, welches in Form und Funktion kundenspezifisch gestaltbare Module und Komponenten beinhaltet. Die Grenzen der Variabilität des Variationssystems werden durch die Schnittstellen sowie durch Prozessrestriktionen und funktionalen Anforderungen gebildet.

## 5.4 Kundenindividuelle Serienfertigung

Ziel des vorgestellten Mischsystems für Wagenkästen ist die Umsetzung einer wirtschaftlichen Serienfertigung, die durch den Anteil der auftragsspezifischen Bausteine eine hohe Kundenorientierung und die Ausbringung auftragsspezifischer Produktausprägungen zulässt. Der gesamten Bildung des Mischsystems einschließlich der Auswahl der einzusetzenden Bauformen, Konfiguration der Produktmodule sowie der Prozessablauf- und Technologieauswahl kommt dabei eine wesentliche Bedeutung zu.

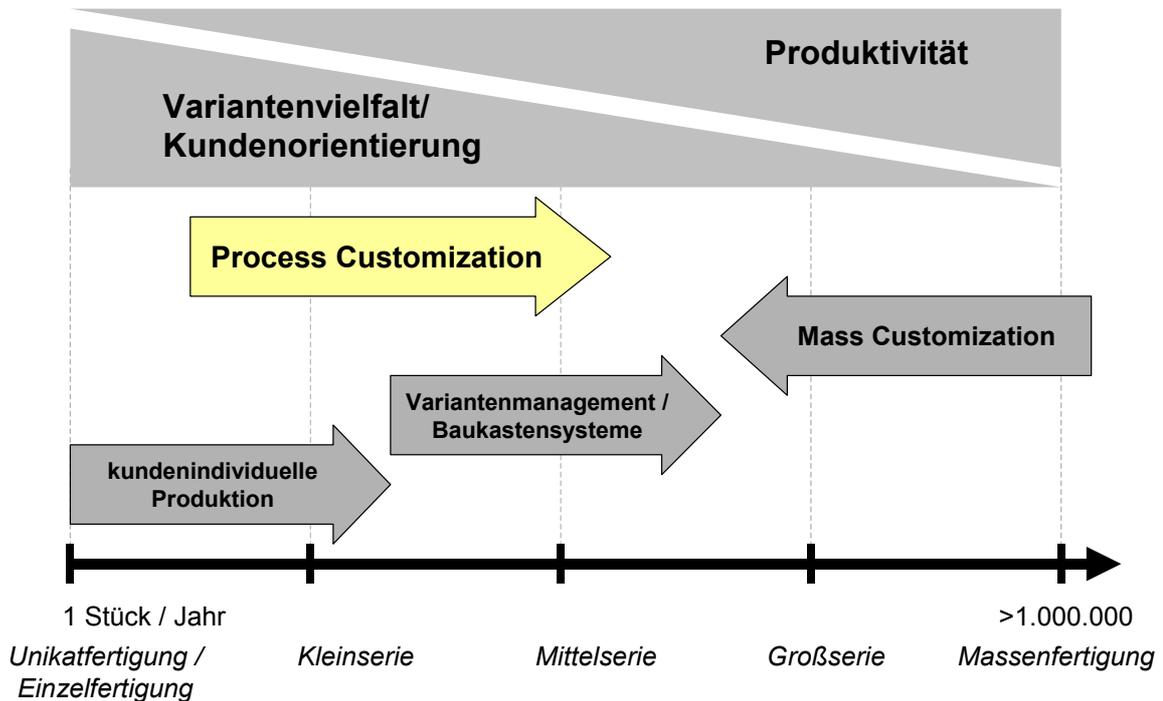
### 5.4.1 Process Customization

Die Generierung des vorgestellten Wagenkastenmischsystems, das als Reaktion auf die Marktanforderungen die Werkzeuge die *Produktmodularisierung* und *Prozessflexibilität* nutzt, wird als zentraler Bestandteil innerhalb eines neuen Produktionskonzeptes im Schienenfahrzeugbau gesehen. Dieses wird nachfolgend unter der Bezeichnung „modul- und *prozessgestützte, kundenindividuelle Serienfertigung*“ oder „*Process Customization*“ (PC) beschrieben.

Der Begriff „*Process*“ ist dabei in einem erweiterten Sinn zu verstehen, der sämtliche Abläufe von der Produktentwicklung und –strukturierung, über die Organisation von Wertschöpfungsnetzwerken, der Produktionsvorbereitung und Technologieauswahl bis zur Endmontage und Demontage beinhaltet.

Der Begriff *Process Customization* orientiert sich an dem aus der „*new economy*“ stammenden Begriff der „*Mass Customization*“ (MC), der mit *kundenindividueller Massenproduktion* übersetzt wird. MC beschreibt die weitgehend kundenindividuelle Produktion von Massengütern [AND98]. Die massenhafte Produktion der Produkte stellt dabei niedrige Produktionskosten sicher, während die kundenindividuelle Anpassung eine hohe Varietät ermöglicht [GRÄ00, PIL98, PIN91]. Mit der Optimierung der produktbezogenen Variantenvielfalt über die Parameter Produktivität und Kundenorientierung verfolgen beide Konzepte ein vergleichbares Ziel, nehmen jedoch eine entgegengesetzte Entwicklungsrichtung ein. Während die *PC* in Richtung *Serienfertigung* ausgehend von einer *kundenspezifischen Unikatfertigung* zielt, ist bei

der *MC* eine *höhere Individualisierung* ausgehend von einer anbieterseitigen, auftragsunspezifischen *Massenfertigung* das Ziel (Bild 54).



**Bild 54** Optimierungsrichtungen und Strategien zum Losgrößenmanagement

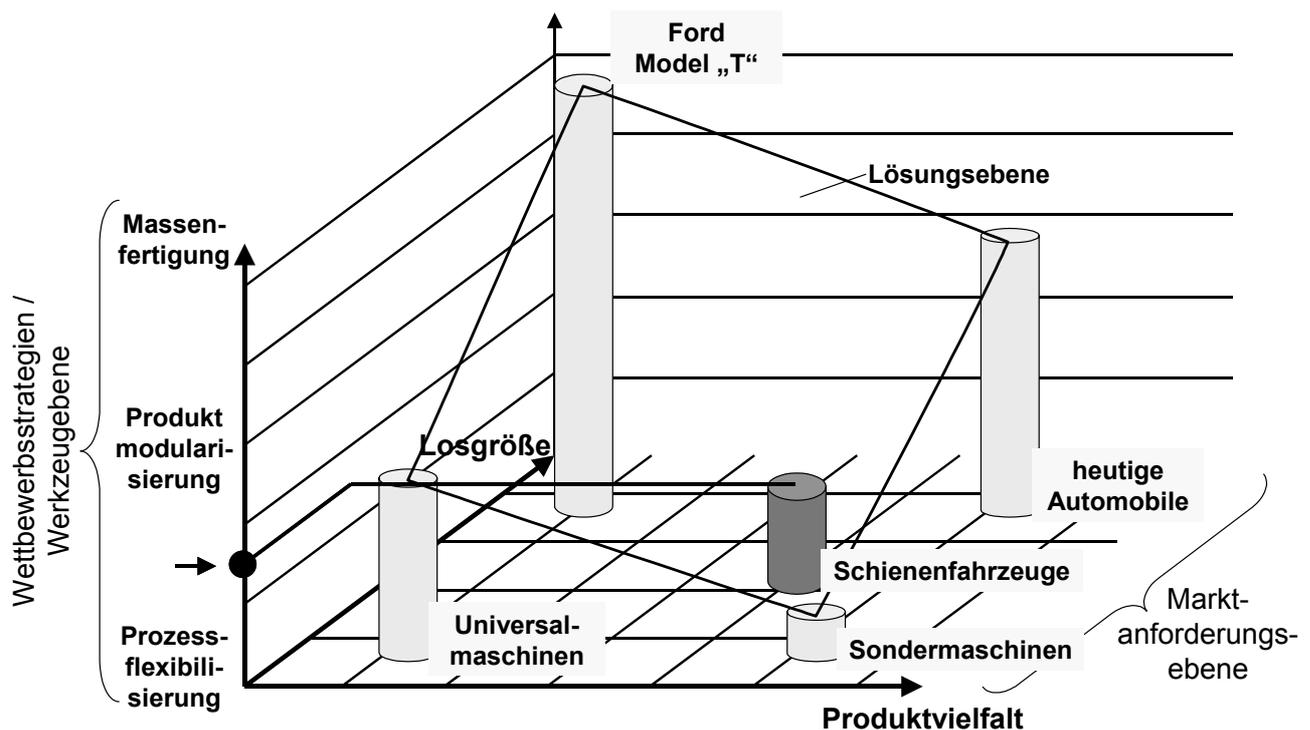
Der Ansatz der *MC* wird ausgehend von der klassischen auftragsneutralen Serienfertigung mit hohen Stückzahlen als Wettbewerbsstrategie zur Lösung des Zielkonfliktes zwischen größtmöglicher Standardisierung von Produkten und Dienstleistungen zur Maximierung der Produktivität und kundenspezifischer Individualisierung zur Erreichung größtmöglicher Kundenzufriedenheit gesehen [AND98, FLE95, TSE96]. *MC* verfolgt das Ziel der Herstellung von Produkten nach Kundenvorgaben zu den Bedingungen, wie Preis, Lieferzeit, Zuverlässigkeit, Qualität etc., von vergleichbaren Massenprodukten [PIN84, PIN91]. Der Begriff *Mass* steht dabei nicht für eine klassische Massenfertigung im ausschließlichen Sinne von hohen Stückzahlen, sondern vielmehr für die Standardisierung und Beherrschung eingesetzter Prozesse und Betriebsmittel sowie organisatorischer Abläufe, wie sie aus der Fertigung von Massenprodukten bekannt sind [PIL98]. *MC* stellt somit einen Ansatz zur Vereinigung der von *PORTER* definierten Wettbewerbsstrategien *Kostenführerschaft* und *Differenzierung* dar [POR92, POR95]. *PORTER* verweist dabei auf das Ausschließlichkeitskriterium, das zur Entscheidung zwischen diesen beiden Strategien zwingt und als *Alternativhypothese* beschrieben wird [POR79]. In jüngster Zeit wird jedoch betont, dass durch den alternativen Einsatz dieser klassischen beiden Wettbewerbsstrate-

gien keine langfristigen Wettbewerbsvorteile zu erzielen sind [GRÄ00]. Die entsprechende *Simultaneitätshypothese* hält die gleichzeitige Realisation von Kostenführerschaft und Differenzierung und ihre simultane Verfolgung im Rahmen einer Wettbewerbsstrategie für möglich und vorteilhaft [MIL93].

Das Konzept der *PC* wird dagegen als strategischer Ansatz gesehen, der eine weitgehend kundenindividuelle Produktgestaltung zu nahezu den Bedingungen einer auftragsneutralen Kleinserienfertigung im Wagenkastenbau ermöglicht. Dies schafft die Voraussetzung für eine wirtschaftliche Umsetzung von kundenspezifischen, heterogenen Anforderungen an die Struktur des Schienenfahrzeugs bei kleinen Losgrößen.

#### **5.4.2 Zuordnung von Marktanforderungen in Wettbewerbsstrategien**

Die Maßnahmen „Produktmodularisierung“ und „Prozessflexibilisierung“ werden innerhalb des Mischsystems als Werkzeuge bzw. als Wettbewerbsstrategie genutzt, um auf die Marktanforderungen „Variantenvielfalt“ und „Losgröße“ zu reagieren. Bild 55 zeigt dabei die Gegenüberstellung von Marktanforderungen und Wettbewerbsstrategien. Die extremen Ausprägungen der Marktanforderungen bilden dabei stellvertretend die Produkte „Unikate“ für maximale Produktvielfalt bei kleinsten Losgrößen, „Nischenprodukte“ für kleine Losgrößen bei kleiner Vielfalt, das Ford „Model T“ für hohe Stückzahlen bei kleiner Vielfalt und das heutige Automobil mit hohen Stückzahlen bei großer Produktvielfalt. Durch diese wird die Lösungsebene aufgespannt, die den Marktanforderungen entsprechende Wettbewerbsstrategien zuweist. Es ist zu erkennen, dass sich für die Einordnung von Schienenfahrzeugen eine Wettbewerbsstrategie zwischen einer Produktmodularisierung und einer Prozessflexibilisierung ergibt.



**Bild 55** Lösungsebene aus Wettbewerbsstrategien und Marktanforderungen

Die beschriebene Strategie der modulbasierten Produkt- und Prozessstrukturierung als Lösungsansatz zum Variantenmanagement für Wagenkästen von Schienenfahrzeugen wird in den nachfolgenden Kapiteln vertiefend behandelt.

### 5.4.3 Die Wagenkastenstruktur als Mischsystem

Der Prozess der Generierung des Wagenkastenmischsystems zur Umsetzung des PC-Ansatzes impliziert die Abkehr der Betrachtung des Wagenkastens als eine einteilige Komponente des Schienenfahrzeugs nach der Art der geschlossenen Röhre (vgl. Kapitel 3.1). Eine modulare Strukturierung des Wagenkastens in einzelne Wagenkastensektionen, aus denen durch entsprechende Montageoperationen komplette Fahrzeuge konfiguriert werden können, stellt damit eine wesentliche Voraussetzung dar. Im folgenden wird für die einzelnen Wagenkastensektionen in Anlehnung an Kapitel 5.2 der Begriff *Wagenkastenmodule* verwendet.

#### 5.4.3.1 Produktstruktur und Prozesszuordnung

Die integrale Gestaltung von Produktstruktur und die Zuordnung von Fertigungsprozessen unter Berücksichtigung von Variationsanforderungen, funktionalen Restriktionen und Fertigungstechnologien sowie der Definition und Umsetzung von

standardisierten Schnittstellen kommt eine zentrale Rolle bei der Generierung des Wagenkastenmischsystems zu.

Die Basismodule des Wagenkastens stellen zusammengefasst die Plattform des *PC*-Konzeptes dar und beinhalten standardisierte Komponenten und Prozesse. Für die Basismodule können anbieterseitig definierte Varianten innerhalb der Plattform vorgesehen werden, die alternativ eingesetzt werden können. Die Breite und Ausprägung dieser Varianten richtet sich dabei in erster Linie nach den Möglichkeiten der eingesetzten Prozesse zur Fertigung der Basismodule. Für die Basismodule des Mischsystems sind Bauweisen und Prozesse mit hoher Produktivität einzusetzen, die eine hohe Wertschöpfung pro Arbeitsschritt ermöglichen. Eine hohe Wertschöpfung erfolgt produktbezogen in der Regel durch eine hohe Integration verschiedener Funktionen in ein Bauteil, das prozessseitig mit möglichst wenigen nacheinandergeschalteten Prozessschritten hergestellt wird [PAH97, SPU94].

Je mehr der zu erfüllenden Funktionen des gesamten Wagenkastens in die Basismodule integriert werden können, desto weniger funktionale Restriktionen entstehen für die Variationsmodule. Gleichzeitig wird so jedoch die Flexibilität des Konzeptes zunehmend beschränkt. Entsprechend der in Kapitel 3.1 dargestellten Fertigungsverfahren besitzen insbesondere Strangpress- (für längsorientierte Integralmodule) oder Formpressenverfahren (für nicht-längsorientierte, flächige Module) Eigenschaften, die bei großer Produktivität einen hohen funktionalen Integrationsgrad, wie die Integration von Kabel- und Klimakanälen sowie Befestigungsschienen, ermöglichen. Diese Verfahren benötigen jedoch aufwendige und kapitalintensive Werkzeuge in Form von Matrizen oder Pressenwerkzeugen. Die Umsetzung kundenspezifischer Anpassungen würde die Modifizierung bzw. Erneuerung dieser Werkzeuge bedingen und zu hohen Investitionen führen. Der Einsatz dieser produktiven Verfahren beschränkt sich damit auf die invariablen Basismodule. Diese können als vormontierte und geprüfte Bestandteile des Wagenkastens beim Hersteller auftragsentkoppelt gefertigt und vorgehalten oder von einem Zulieferer nach Auftragseingang bezogen werden.

Die Variationsmodule werden dagegen auftragsspezifisch entwickelt und gefertigt. Diese Module bestehen aus standardisierten Grundelementen, wie beispielsweise Halbzeugen, Profilen und Verbindungselementen, die über standardisierte Prozessabläufe kundenspezifisch gefertigt werden. Für die Variationsmodule werden flexible Bauweisen und Technologien eingesetzt, die eine Herstellung von auftragsspezifischen Produkten über geschlossene Prozessketten und eine numerisch gestützte, parametrische CAD/CAM-Kopplung der Betriebsmittel ermöglichen. Geeignete Technologien für den Einsatz im Wagenkastenbau sind das Laserschneiden und –biegen,

der Einsatz von formlosen Profilbiegeanlagen sowie das elektromagnetisch Fügen [ALT99, DOE95, OLL98]. Ebenso ist der Einsatz von Rapid-Tooling-Werkzeugen, modularen Umformwerkzeugen und numerisch gesteuerten Werkzeugsystemen mit Stiftmatrizen für Umformprozesse von Komponenten der Wagenkastenbeplankung denkbar [GRÄ00].

Die Prozesse sind dabei derart zu gestalten, dass sie eine hohe Produktvielfalt bei geringer Prozessdynamik ermöglichen. Die Vorteile einer hohen geometrischen Flexibilität und die mögliche Vielfalt einzusetzender Werkstoffe der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Differentialbauweise können für die Variationsmodule gezielt genutzt werden. Moderne, hochflexible Umformverfahren für Profile, wie beispielsweise das Abroll-Streck-Biegen (ASB), das räumliche Abroll-Streck-Biegen (RASB) oder das Press-Roll-Walz-Biegen (PRWB), ermöglichen eine nahezu beliebige Formgebung von Profilen ohne eine konstruktive Anpassung der einzusetzenden Werkzeuge (Bild 56). Die Beplankung der Strukturgerippe der Variationsmodule kann je nach Anforderungen an den Wagenkasten mit Stahl- oder Aluminiumblechen oder mit Faserverbundkunststoffen erfolgen.

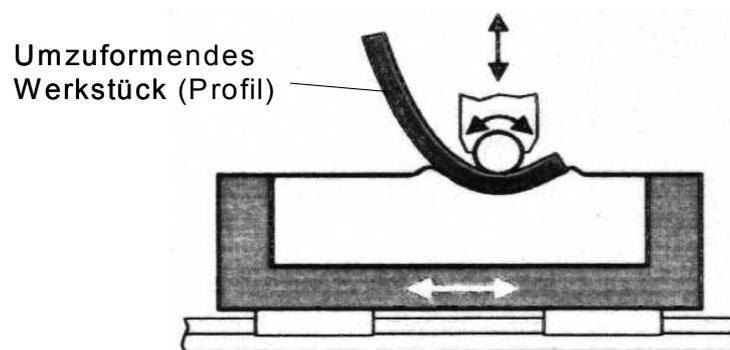


Bild 56 Wirkprinzip einer formlosen, hochflexiblen, numerisch gesteuerten Profilbiegemaschine [GEI95]

#### 5.4.3.2 Konfigurations- und Berechnungswerkzeuge

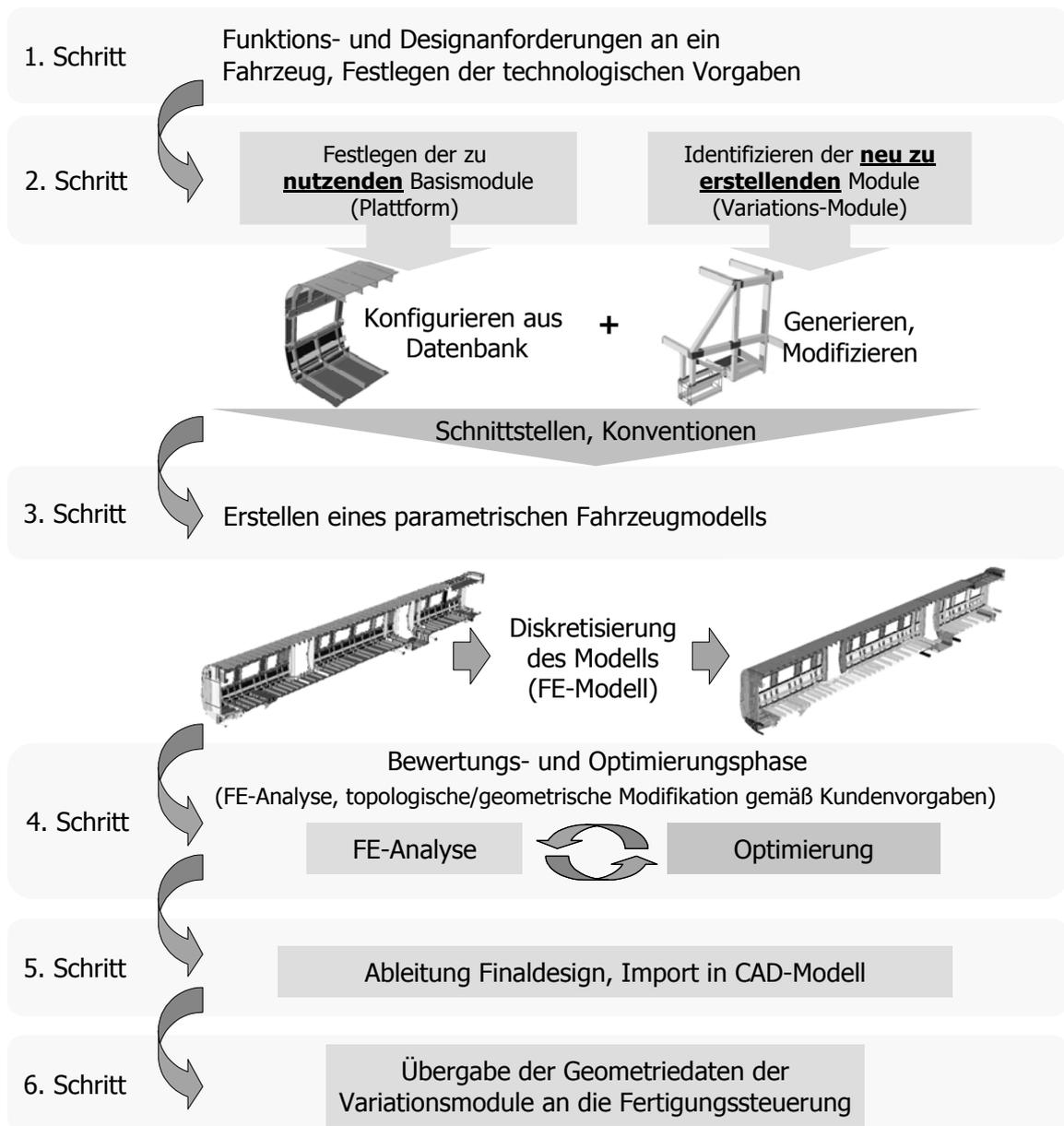
In Abgrenzung zu klassischen Baukasten- oder Plattformsystemen, die der generischen oder quantitativen Modularisierung folgen, und bei denen eine definierte, anbieterspezifische Anzahl von Produktvarianten ermöglicht wird, und deren Eigenschaften dem Hersteller vollständig bekannt sind, führt das vorgestellte *PC*-Konzept zu einer unbegrenzten Anzahl von Produktausprägungen. Daraus folgt, dass die Eigenschaften aller Produktvarianten nicht bekannt sein können. Es ist jede Variante in ihrem Gesamtkonzept neu zu bewerten und ggf. konstruktiv zu optimieren. Um den Konstruktions- und Entwicklungsaufwand innerhalb des *PC*-Konzeptes

zu begrenzen, müssen geeignete numerische Werkzeuge zur Verfügung stehen, die eine schnelle Konfiguration, kundenspezifische Anpassung und Bewertung der auftragsspezifischen Produktausprägungen ermöglichen.

Die Basismodule des Wagenkastens können als CAD- und diskretisierte FE-Modelle in einer Datenbank abgelegt werden, wobei sämtliche Eigenschaften der Basismodule bekannt sind. Die wesentlichen Konstruktions- und Berechnungsarbeiten beschränken sich auf die Variationsmodule sowie auf die abschließende Überprüfung des Gesamtfahrzeuges.

Für eine schnelle Generierung und Anpassung von numerischen Geometriedaten-Modellen für die Variationsmodule bieten Entwicklungswerkzeuge zur Erstellung von parametrischen, topologiebasierten 3D-CAD-Modellen eine geeignete Unterstützung [VOL00]. Bei derartigen Modellen wird die Geometrie über Parameter beschrieben. Durch Variation dieser Parameter kann diese verändert werden, ohne dass der topologische Zusammenhalt der Fahrzeugstruktur manuell angepasst werden muss [SCH00]. Dies gewährleistet eine schnelle Anpassung der Variationsmodule an Kundenvorgaben. Im Gegensatz dazu weisen konventionelle CAD-Werkzeuge in der Phase der Konzepterstellung und der Variation von Modellen Nachteile auf, da sie einen reinen geometriebasierten Ansatz besitzen [FEL97a, KRA00]. Bei einer kundenspezifischen geometrischen Veränderung ist der topologische Zusammenhalt des Modells vom Benutzer manuell wieder herzustellen. Dies erschwert eine schnelle kundenspezifische Änderung der Modelle.

Der Konfigurations- und Konstruktionsprozess innerhalb des *PC*-Konzeptes unter Einsatz geeigneter Entwicklungswerkzeuge ist in Bild 57 skizziert.



**Bild 57** Ablauf des CAD/CAE-gestützten Konstruktionsprozesses innerhalb des PC-Konzeptes

Zur Erzielung von kurzen Entwicklungszeiten ist bei der Einbindung von entsprechenden IT-Werkzeugen die Möglichkeit der durchgängigen, prozessbegleitenden Datennutzung eine wesentliche Voraussetzung. Erarbeitete Produkt- und Prozessdaten der Variationsmodule können zur Steuerung der Entwicklung nachgeschalteter Produktionsprozesse im Rahmen einer CIM-Strategie genutzt werden [TRE00].

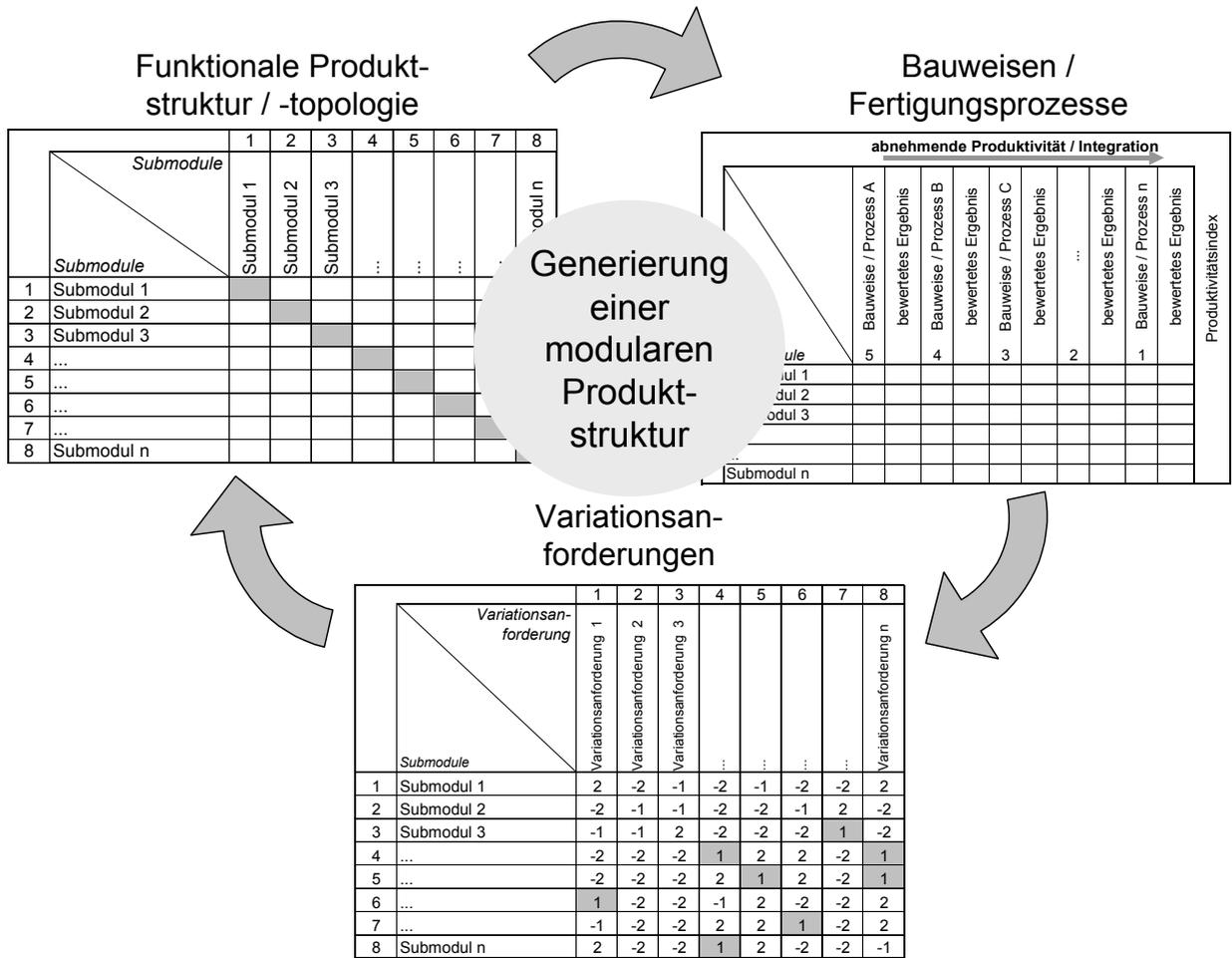
#### 5.4.4 Vorgehensweise zur Generierung des Mischsystems

Der Prozess zur Generierung einer Wagenkastenstruktur als Mischsystem gliedert sich in fünf wesentliche Schritte:

1. Gliederung der Produktstruktur des Wagenkastens in kleine, lokale Wagenkastensegmente geringer Komplexität (Submodulbildung),
2. Analyse der topologischen Relationen der Submodule zueinander,
3. Definition von geometrischen Variationsanforderungen und Analyse der Auswirkungen auf die Fahrzeugstruktur,
4. Zuordnung von geeigneten Fertigungsverfahren unter Berücksichtigung einer Variantenbildung und Festlegung der Fertigungstiefe und
5. Zusammenfassung der Submodule unter Berücksichtigung der Punkte 2 bis 4 und Ableitung der Basis- und der Variationsmodule.

Die dargestellten Vorgehensschritte üben ausgeprägte Wechselwirkungen aufeinander aus. Vielfach sind nicht alle Aspekte, die zu der Festlegung einer geeigneten Produktstruktur und eines entsprechenden Fertigungskonzeptes führen, im Vorfeld bekannt, da sie zum Teil aus unternehmerischen Interessenlagen resultieren. Hierdurch kann das obige Vorgehen nicht unbedingt zu *einer* eindeutigen Lösung für die Produktstruktur und der Definition der Basis- und Variationsmodule führen. Der Vorgang des mehrfachen Durchlaufens der genannten Schritte ist vielmehr als Optimierungsproblem zu verstehen, die Bestimmung der geeigneten Strukturierung des Wagenkastens erfolgt in einem Näherungsprozess (Bild 58).

Ausgehend von einer stark segmentierten Wagenkastenstruktur, die sich aus Submodulen zusammensetzt, erfolgt die Bildung der endgültigen Produktstruktur unter Berücksichtigung der funktional bedingten topologischen Verbindungen der Submodule, der möglichen Variationsanforderungen und der entsprechenden Auswirkungen auf die Submodule sowie der Zuteilung geeigneter Bauweisen und Fertigungsprozesse. Dieser Prozess wird über die Erstellung von Matrizen und mit Hilfe mathematische Ordnungsoperationen unterstützt. Nachfolgend wird das Vorgehen detailliert beschrieben.

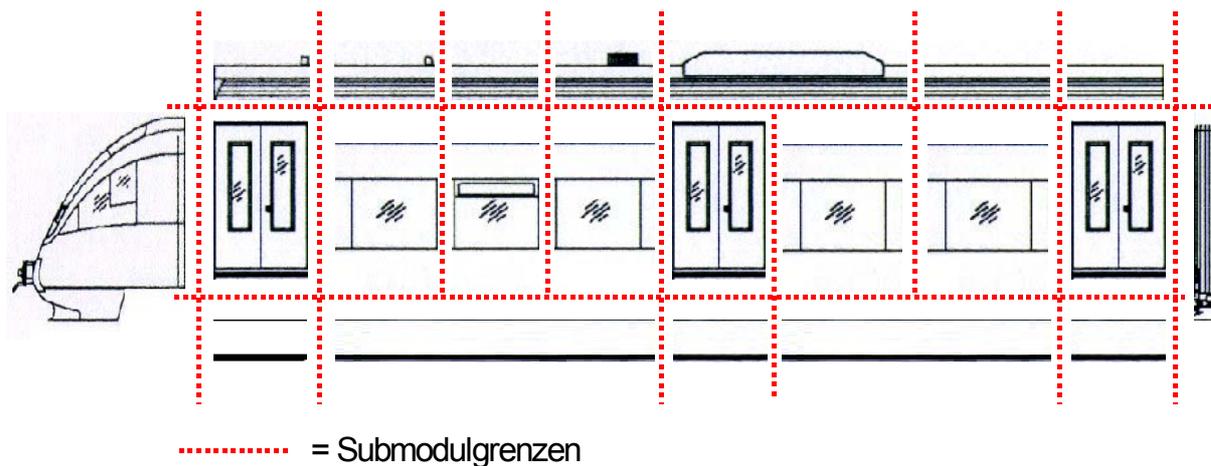


**Bild 58** Die Mischsystembildung als Optimierungsproblem

Der Übergang von einem stark modularen System aus Submodulen kleinen Umfangs zu einer Produktstruktur geringeren Modularisierungsgrades wird vorgenommen, um die Komplexität des Gesamtsystems Wagenkasten zu reduzieren und den Produktions- und Montageaufwand durch den Wegfall von Schnittstellen zu begrenzen (vgl. Kapitel 5.3.3). Ziel der Vorgehensweise ist die Generierung einer geeigneten modularen Produktstruktur für den Wagenkasten sowie die Bildung von fixen Basis- und flexiblen Variationsmodulen unter Berücksichtigung funktionaler, variationsorientierter und produktionstechnischer Anforderungen.

**5.4.4.1 Submodulbildung**

In einem ersten Schritt wird der Wagenkasten in eine stark segmentierte Produktstruktur überführt. D.h., die Produktstruktur des Wagenkastens wird in kleine lokale Wagenkastensegmente, in sog. Submodule, untergliedert (Bild 59).



**Bild 59** Exemplarische Bildung der Submodule am Wagenkasten (Seitenansicht)

Je höher die Auflösung der Struktur in dieser Phase gewählt wird, d.h. je kleiner die Submodule sind, um so exakter kann ein geeignetes Modulkonzept hinsichtlich Flexibilität *und* Produktivität gefunden werden. Die Generierung des Mischsystems gestaltet sich mit zunehmender Anzahl an Submodulen jedoch auch aufwendiger. In dieser Phase können bereits strategische und unternehmensspezifische Randbedingungen berücksichtigt werden. Ist beispielsweise im Vorfeld vorgesehen, das Dach oder das Fensterband als komplettes Basismodul fremd zu beziehen, so wird dieses nicht weiter segmentiert.

Im Anschluss an die Submodulbildung werden die topologischen Relationen der einzelnen Submodule hinsichtlich ihrer Stärke bewertet (**Bild 60**). Das Ergebnis der Matrix zeigt auf, welche Submodule aufgrund ihrer starken topologischen Relation zusammengefasst werden sollten und welche sich für eine physische Trennung eignen.

Submodule		1	2	3	4	5	6	7	8
		Submodul 1	Submodul 2	Submodul 3	⋮	⋮	⋮	⋮	Submodul n
1	Submodul 1		-2	-1	-2	-1	-2	-2	<b>2</b>
2	Submodul 2	-2		-1	-2	-2	-1	<b>2</b>	-2
3	Submodul 3	-1	-1		-2	-2	-2	1	-2
4	...	-2	-2	-2		<b>2</b>	<b>2</b>	-2	1
5	...	-2	-2	-2	<b>2</b>		<b>2</b>	-2	1
6	...	1	-2	-2	-1	<b>2</b>		-2	<b>2</b>
7	...	-1	-2	-2	<b>2</b>	2	1		<b>2</b>
8	Submodul n	<b>2</b>	-2	-2	1	<b>2</b>	-2	-2	

2 = starke, direkte topologische Anbindung, Integration sinnvoll  
 1 = vorhandene topologische Anbindung, Integration möglich, Schnittstelle erforderlich  
 -1 = schwache topologische Anbindung, Schnittstelle ist vorzusehen, Trennung möglich  
 -2 = keine direkte topologische Anbindung, Trennung sinnvoll

**Bild 60** Analysematrix der *topologischen Relationen* zwischen den Submodulen des Wagenkastens (Beispielmatrix)

**5.4.4.2 Analyse der Auswirkungen von Variationsanforderungen**

Im nächsten Schritt werden in einer zweiten Matrix die Variationsanforderungen an die Geometrie des Wagenkastens, wie beispielsweise die Variation der Fahrzeugbreite, und –höhe, die Variation der Fenstergeometrie etc., hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Submodule bewertet (Bild 61).

		1	2	3	4	5	6	7	8
		Variationsanforderung 1	Variationsanforderung 2	Variationsanforderung 3	⋮	⋮	⋮	⋮	Variationsanforderung n
Submodule									
1	Submodul 1	2	-2	-1	-2	-1	-2	-2	2
2	Submodul 2	-2	-1	-1	-2	-2	-1	2	-2
3	Submodul 3	-1	-1	2	-2	-2	-2	1	-2
4	...	-2	-2	-2	1	2	2	-2	1
5	...	-2	-2	-2	2	1	2	-2	1
6	...	1	-2	-2	-1	2	-2	-2	2
7	...	-1	-2	-2	2	2	1	-2	2
8	Submodul n	2	-2	-2	1	2	-2	-2	-1

2 = starker Einfluss, Modul muss individuell angepasst werden  
 1 = bei geeigneter Modulteilung kann ggf. individuelle Anpassung vermieden werden  
 -1 = bei geeigneter Modulteilung nur geringer bis kein Einfluss  
 -2 = vorauss. kein Einfluss

**Bild 61** Analysematrix des Einflusses von *Variationsanforderungen* auf die Submodule des Wagenkastens (Beispielmatrix)

Das Ergebnis dieser Matrix ermöglicht eine Clusterung von Submodulen nach den Auswirkungen der *Variationsanforderungen*. Gleichzeitig kann hieraus entnommen werden, für welche Submodule oder Gruppen von Submodulen anbieterseitige Varianten vorgesehen werden sollten. Dies ist dann anzustreben, wenn eine *Variationsanforderung* definierte und begrenzte geometrische Veränderungen hervorruft, so dass mit wenigen anbieterseitigen Varianten eine große Flexibilität ermöglicht wird. Ist die Ausprägung der Auswirkung einer *Variationsanforderung* nicht vorhersehbar und geometrisch damit nicht definierbar, so müssen die betroffenen Bereiche als „free-to-design-Bereiche“ identifiziert werden.

**5.4.4.3 Bauweisen- und Prozesszuordnung**

In diesem Schritt der Mischsystembildung werden den Submodulen unter Berücksichtigung der Auswirkungen der *Variationsanforderungen* geeignete Bauweisen und Fertigungsverfahren zugeordnet. Hierbei fließen bereits Aspekte der Kernkompetenz und der geplanten Fertigungstiefe des Herstellers mit ein. Durch die Zuweisung von Technologien, die das Unternehmen als Kernkompetenz betrachtet oder die es an Zulieferer vergeben möchte, werden bereits in dieser Phase Organisationsstrukturen für eine verteilte Modulentwicklung und –fertigung erstellt. Welche Bauweise und

welche Technologie für welche Submodule geeignet ist, hängt von der spezifischen Konstruktion, der Unternehmenskompetenz und –strategie sowie von weiteren Randbedingungen ab. So ist beispielsweise die Änderung eines durch Strangpressen hergestellten Profils durch den Einsatz von flexiblen Strangpresswerkzeugen oder das nachträgliche Umformen oder Umrüsten der Strangpressprofile technisch möglich, jedoch wirtschaftlich im Einzelfall zu überprüfen [HER92].

Um die Matrix in einem späteren Schritt ordnen zu können, wird den verschiedenen Bauweisen und Prozessen ein Produktivitätsgrad zugewiesen. Dieser Grad richtet sich vorrangig nach Kriterien der Durchlaufzeit, dem Wertschöpfungsgrad pro Fertigungsschritt und der Möglichkeit, große Wagenkastensegmente wirtschaftlich herzustellen. Das bewertete Ergebnis für ein Submodul ergibt sich dann aus dem Produkt der Eignung einer Bauweise und des zugehörigen Prozesses mit dem Produktivitätsgrad. Die Summe der bewerteten Ergebnisse in einer Zeile führt dann zu einem Produktivitätsindex für ein Submodul. Zur Erhöhung der Übersicht in der Matrix werden Bauweisen und Prozesse hinsichtlich ihrer Produktivität und ihres Integrationsgrades von links nach rechts geordnet (Bild 62).

		abnehmende Produktivität / Integration									
		1		2		3		4		5	
Bauweise / Prozess		Bauweise / Prozess A	bewertetes Ergebnis	Bauweise / Prozess B	bewertetes Ergebnis	Bauweise / Prozess C	bewertetes Ergebnis	..	bewertetes Ergebnis	Bauweise / Prozess n	bewertetes Ergebnis
Submodule		5	4	3	2	1	0	n.b.	0	1	2
1	Submodul 1										
2	Submodul 2										
3	Submodul 3										
5	...										
12	...										
13	Submodul n										

3 = geeignete Bauweise / Prozess  
 2 = kann mit Einschränkungen so ausgeführt werden  
 1 = erhebliche Einschränkungen - wenig geeignete Bauweise / Prozess  
 0 = ungeeignete Bauweise / Prozess  
 n.b. = nicht bewertet

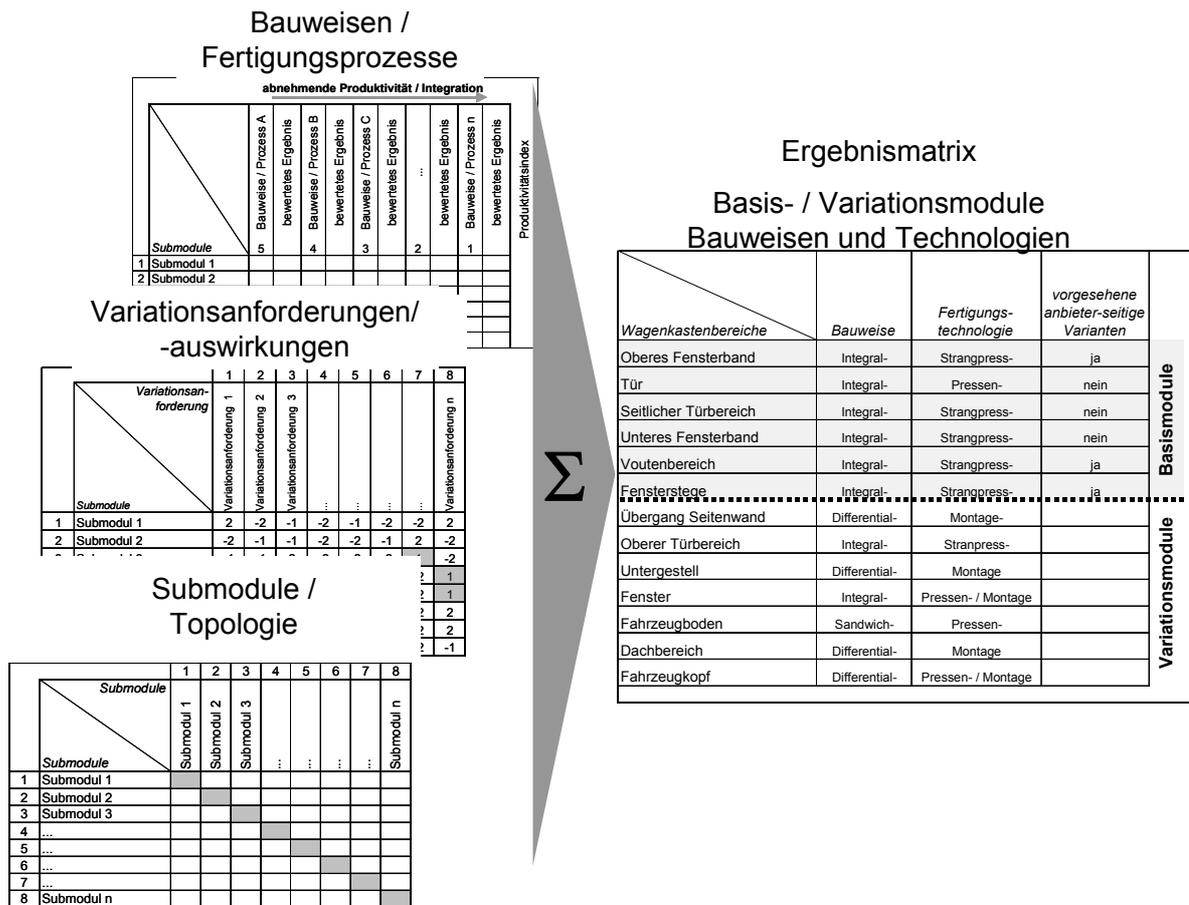
**Bild 62** Matrix zur Zuordnung von *Bauweisen und Fertigungstechnologien* auf die Submodule (Beispielmatrix)

#### 5.4.4.4 Ableitung von Basis- und Variationsmodulen

Durch den Vergleich der drei Matrizen *Topologie*, *Variationsanforderungen*, *Bauweisen/Fertigungstechnologien* kann eine geeignete, modulare Wagenkastenstruktur abgeleitet werden. Ziel des Vergleichs der Matrizen ist es Submodule zusammenzufassen, die

- eine ausgeprägte topologische Relation zueinander aufweisen,
- von gleichen oder gekoppelten Variationsanforderungen betroffen sind und
- sich in der gleichen Bauweise und einem identischen Fertigungsverfahren geeignet herstellen lassen.

Der in Submodule kleinen Umfangs unterteilte Wagenkasten wird damit in eine Produktstruktur überführt, die sich aus größeren, komplexeren Strukturmodulen zusammensetzt. Lassen sich keine Submodule identifizieren, die in den oben genannten Kriterien Übereinstimmungen aufweisen, so ist zu prüfen, ob durch eine geänderte Bauweise mit zugehörigem alternativen Fertigungsverfahren eine Übereinstimmung erreicht werden kann. Es ist jedoch auch möglich, dass keine Zusammenlegung von Submodulen erfolgen kann. Hierbei ist der Prozess der Mischsystemgenerierung mit einer neuen, geänderten Submodulbildung erneut zu durchlaufen. Die dann gebildeten Module des Wagenkastens lassen sich anschließend in die Basismodule, die – ggf. um anbieterseitige Varianten dieser Module ergänzt – die Plattform bilden, und die Variationsmodule, die sich aufgrund ihrer Bauform und ihrer Fertigungstechnik kundenspezifisch anpassen lassen, unterteilen (Bild 63).



**Bild 63** Bildung der Ergebnismatrix und Ableitung der Basis- und Variationsmodule

## 6 Anwendungsbeispiel und Realisierungsansatz

### 6.1 Anwendungsbeispiel zur Mischsystembildung des Wagenkastens

Zur Verdeutlichung der in Kapitel 5.4.4 beschriebenen Vorgehensweise zur Bildung des Wagenkastenmischsystems wird diese nun an einem konkreten Beispiel umgesetzt.

Wie bereits dargestellt, kann die Strukturierung des Wagenkastens sehr unterschiedliche Ausprägungen besitzen. Die Eignung eines Modulkonzeptes richtet sich dabei primär nach den zu erreichenden Zielen der Modularisierung. Diese können neben dem Ziel der vereinfachten Produktvariantenbildung auch in der Optimierung der Montage durch verbesserte Zugänglichkeit, der Parallelisierung von Fertigungsprozessen, der Fremdvergabe kompletter Module, dem belastungsorientierten Einsatz verschiedener Werkstoffe oder auch in der Anwendung verschiedener Fertigungstechnologien liegen. Da diese Arbeit die wirtschaftliche Bildung auftragsspezifischer Produktvarianten mit Hilfe des *PC*-Ansatzes zum Ziel hat, wird die Eignung eines Modulkonzeptes in diesem Beispiel unter besonderer Berücksichtigung der variantenbildenden Kriterien unter Nutzung einer größtmöglichen Standardisierung beurteilt.

#### 6.1.1 Submodulbildung und Topologieanalyse

Im ersten Schritt wird der Wagenkasten in Submodule unterteilt. Es werden 13 Submodule definiert, die in Tab. 5 dargestellt sind. Im Anschluss werden die topologischen Relationen zwischen den einzelnen Submodulen bewertet. Der Wert „2“ steht für eine direkte, starke topologische Anbindung, „1“ für eine vorhandene Anbindung, „-1“ für eine schwache topologische Anbindung und „-2“ für keine topologische Anbindung.

Submodule		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		Dachbereich	Fahrzeuboden	Fahrzeugkopf	Fenster	Fensterstege	Oberer Türbereich	Oberes Fensterband	Seitlicher Türbereich/Türsäulen	Tür	Übergang Seitenwand/Boden	Unteres Fensterband	Untergestell	Voutenbereich
1	Dachbereich	X	-2	-1	-2	-2	1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	2
2	Fahrzeuboden	-2	X	-1	-2	-2	-2	-2	-1	2	2	-1	2	-2
3	Fahrzeugkopf	-1	-1	X	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	1	-2
4	Fenster	-2	-2	-2	X	2	-1	2	1	-1	-2	2	-2	1
5	Fensterstege	-2	-2	-2	2	X	-1	2	1	1	1	2	-2	1
6	Oberer Türbereich	1	-2	-2	-1	-1	X	2	2	2	-2	-2	-2	2
7	Oberes Fensterband	-1	-2	-2	2	2	2	X	1	2	-2	1	-2	2
8	Seitlicher Türbereich/Türsäulen	-2	-1	-2	1	1	2	1	X	2	2	1	-1	-1
9	Tür	-2	2	-2	-1	1	2	2	2	X	1	1	2	1
10	Übergang Seitenwand/Boden	-2	2	-2	-2	1	-2	-2	2	1	X	2	2	-2
11	Unteres Fensterband	-2	-1	-2	2	2	-2	1	1	1	2	X	-1	-2
12	Untergestell	-2	2	1	-2	-2	-2	-2	-1	2	2	-1	X	-2
13	Voutenbereich	2	-2	-2	1	1	2	2	-1	1	-2	-2	-2	X

2 = starke, direkte topologische Anbindung, Integration sinnvoll  
1 = vorhandene topolog. Anbindung, Integration möglich, Schnittstelle erforderlich  
-1 = schwache topolog. Anbindung, Schnittstelle ist vorzusehen, Trennung möglich  
-2 = keine direkte topologische Anbindung, Trennung sinnvoll

**Tab. 5** Relationsmatrix Topologie des Wagenkastens

Die dunkel hervorgehobenen Bereiche kennzeichnen dabei Submodulpaarungen, die keine topologische Verbindung aufweisen. Diese Submodule erscheinen für die Bildung von umfangreicheren Strukturmodulen durch eine Zusammenlegung für nicht geeignet.

Zur einfacheren Identifizierung von potenziell für eine Integration geeigneten Submodulen wird im zweiten Schritt die Matrix so geordnet, dass möglichst alle Submodule mit einer starken topologischen Abhängigkeit in die Nähe der Mitteldiagonalen gelangen. Die Submodule mit keiner topologischen Anbindung sollen dabei möglichst von der Diagonalen entfernt angeordnet werden. Dies kann mit Hilfe der Methode der binären Sortierung erfolgen<sup>2</sup>. Nach Neuordnung der Matrix hat diese die in Tab. 6 dargestellte Form.

<sup>2</sup> Zu weiterführenden Erläuterungen zur binären Sortierung siehe auch: Günther, Tempelmeier: Produktionsmanagement, 1995, S. 118-120 und Günther, Tempelmeier: Produktion, 1997, S. 99-104

Submodule		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Binärzahl 1	Binärzahl 2
		Untergestell	Fahrzeugboden	Fahrzeugkopf	Dachbereich	Voutenbereich	Oberes Fensterband	Fenster	Unteres Fensterband	Fensterstege	Übergang Seitenwand/Boden	Oberer Türbereich	Tür	Seitlicher Türbereich/Türsäulen		
1	Untergestell	X	2	1	-2	-2	-2	-2	-1	-2	2	-2	2	-1	5584	10250
2	Fahrzeugboden	2	X	-1	-2	-2	-2	-2	-1	-2	2	-2	2	-1	5588	18442
3	Fahrzeugkopf	1	-1	X	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	32642	2048
4	Dachbereich	-2	-2	-1	X	2	-1	-2	-2	-2	-2	1	-2	-2	28419	2304
5	Voutenbereich	-2	-2	-2	2	X	2	1	-2	1	-2	2	1	-1	2567	3204
6	Oberes Fensterband	-2	-2	-2	-1	2	X	2	1	2	-2	2	2	1	2055	2390
7	Fenster	-2	-2	-2	-2	1	2	X	2	2	-2	-1	-1	1	2079	176
8	Unteres Fensterband	-1	-1	-2	-2	-2	1	2	X	2	2	-2	1	1	4180	88
9	Fensterstege	-2	-2	-2	-2	1	2	2	2	X	1	-1	1	1	23	224
10	Übergang Seitenwand/Boden	2	2	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	X	-2	1	2	4564	24609
11	Oberer Türbereich	-2	-2	-2	1	2	2	-1	-2	-1	-2	X	2	2	2567	387
12	Tür	2	2	-2	-2	1	2	-1	1	1	1	2	X	2	20	24709
13	Seitlicher Türbereich/Türsäulen	-1	-1	-2	-2	-1	1	1	1	1	2	2	2	X	20	14
<b>Binärzahl 1</b>		2P0	2P1	2P2	2P4	2P6	2P7	2P8	2P9	2P10	2P11	2P12	2P13	2P14	(-2)	
Ergebnis		1	2	4	16	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384		
<b>Binärzahl 2</b>		2P14	2P13	2P12	2P10	2P8	2P7	2P6	2P5	2P4	2P3	2P2	2P1	2P0	(2)	
Ergebnis		16384	8192	4096	1024	256	128	64	32	16	8	4	2	1		

2 = starke, direkte topologische Anbindung, Integration sinnvoll  
 1 = vorhandene topolog. Anbindung, Integration möglich, Schnittstelle erforderlich  
 -1 = schwache topolog. Anbindung, Schnittstelle ist vorzusehen, Trennung möglich  
 -2 = keine direkte topologische Anbindung, Trennung sinnvoll

Tab. 6 Relationsmatrix Topologie des Wagenkastens nach binärer Sortierung

Entlang der Hauptdiagonalen der Matrix sind nun Submodulpaarungen ersichtlich, die sich aufgrund ihrer topologischen Relationen zur Integration in größere Module eignen. In Tab. 6 sind diese dick umrandet. Um eine geeignete Modulbildung zu erhalten, sind jedoch die weiteren Schritte der Mischsystemgenerierung durchzuführen.

### 6.1.2 Analyse der Auswirkungen von Variationsanforderungen

Im nächsten Schritt werden potenzielle geometrische Variationsanforderungen des Marktes auf den Wagenkasten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Submodule in Tab. 5 bewertet. Hierzu wurden im vorliegenden Beispiel 10 mögliche Variationsanforderungen aufgestellt, die in den Spalten von Tab. 7 dargestellt sind. Anhand der Matrix werden die Auswirkungen dieser Variationsanforderungen auf die in den Zeilen stehenden Submodule wie folgt bewertet:

- Bewertung mit „2“, wenn das Submodul erheblich von einer Variationsanforderung betroffen ist,
- Bewertung mit „1“, wenn durch eine geeignete Modulteilung und das Vorsehen von Varianten für das Submodul eine individuelle Anpassung vermieden werden kann,
- Bewertung mit „-1“, wenn bei geeigneter Modulteilung unter Einschränkung der Flexibilität keine individuelle Anpassung des Submoduls erforderlich ist und
- Bewertung mit „-2“, wenn die Variationsanforderung keine Auswirkung auf das Submodul besitzt.

Bei der Bewertung der Variationsauswirkungen sind bereits bauliche Konzepte des Wagenkastens und strategische Aspekte der Fertigung und Fremdvergabe von Modulen zu berücksichtigen, da eine veränderte Bauweise auch unterschiedliche Auswirkungen von Variationsanforderungen auf die Submodule zur Folge haben kann. So kann eine Variation der Fahrzeughöhe sowohl über die Seitenwand einschließlich einer Anpassung der Fenstergröße, als auch über die Voutenmodule, die den Übergang zwischen Seitenwand und Dach beschreiben, oder den Übergangsbereich zwischen Fahrzeugboden und Seitenwand erfolgen.

Es ergibt sich schließlich folgende Matrix:

Variationsanforderung		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Variation Bodenhöhe in bestimmten Bereichen (HF/NF)	Variation Bodenhöhe voll- ständig (HF/NF)	Geometrievariation Fenster	Variation Anzahl Fenster	Skalieren Fahrzeugbreite	Skalieren Fahrzeuglänge	Skalieren Fahrzeughöhe	Geometrische Variation Tür	Variation Anzahl Tür	Anpassung Neigtechnik
Submodule											
1	Dachbereich	-2	-2	-2	-2	1	1	-1	-2	1	1
2	Fahrzeugboden	2	2	-2	-2	2	2	-2	1	1	1
3	Fahrzeugkopf	-1	-1	-2	-2	2	-2	2	-2	-2	-1
4	Fenster	-1	-1	1	1	-2	-1	1	-1	-1	-1
5	Fensterstege	-2	-2	1	2	-2	1	1	-2	-2	-1
6	Oberer Türbereich	-2	-2	-2	-2	-2	1	1	2	1	1
7	Oberes Fensterband	-2	-2	1	1	-2	2	1	1	1	-1
8	Seitlicher Türbereich/Türsäulen	1	1	-2	-2	-2	-1	-1	2	1	1
9	Tür	1	1	-2	-2	-2	-1	-1	2	1	1
10	Übergang Seitenwand/Boden	2	1	-1	-1	-1	-1	-2	1	1	2
11	Unteres Fensterband	2	1	1	1	-2	2	1	1	-1	2
12	Untergestell	2	2	-1	1	2	2	-1	-1	2	1
13	Voutenbereich	-2	-2	-1	-2	2	2	2	-2	-2	2
		2 = starker Einfluß, Submodul muss individuell angepasst werden 1 = bei geeigneter Modulteilung oder einer entsprechenden Variantenbildung kann individ. Anpassung vermieden werden -1 = bei geeigneter Modulteilung nur geringen bis keinen Einfluss -2 = vorauss. keinen Einfluss									

**Tab. 7** Analyse der Auswirkungen von Variationsanforderungen auf Submodule

Die Matrixfelder, bei denen der Wert „-2“, eingetragen ist, wo demnach kein Einfluss der Variationsanforderung auf das Submodul besteht, sind dunkel markiert. Eine Ordnung der Matrix entsteht dadurch, dass die Zeilen der Submodule, die am wenigsten von den Variationsanforderungen betroffen sind, oben, und die der am meisten von Änderungen betroffenen Submodule unten stehen. Diese Ordnung ergibt sich aus der Summierung der Werte pro Zeile. Aus dieser Summe lässt sich dann eine erste Einordnung der Submodule in potenzielle Basis- und Variationsmodule, bzw. free-to-design-Bereiche, vornehmen. Die Grenze für die Bildung dieser Module ist in Abhängigkeit von der zu erzielenden Flexibilität des Konzepts sowie den konstruktiven und fertigungstechnischen Möglichkeiten des Herstellers im Einzelfall festzulegen. Im vorliegenden Beispiel wurde diese Grenze so gewählt, dass sich eine Baustruktur mit relativ hohem Anteil von Basismodulen, d.h. hohem Standardisierungsanteil ergibt.

Variationsanforderung		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Summe	geforderte Flexibilität
		Variation Bodenhöhe in bestimmt. Bereichen (HF/NF)	Variation Bodenhöhe vollständig (HF/NF)	Geometrievariation Fenster	Variation Anzahl Fenster	Skalieren Fahrzeugbreite	Skalieren Fahrzeuglänge	Skalieren Fahrzeughöhe	Geometrische Variation Tür	Variation Anzahl Tür	Anpassung Neigtechnik		
Submodule													
1	Fahrzeugkopf	-1	-1	-2	-2	2	-2	2	-2	-2	-1	-9	Basismodule
2	Dachbereich	-2	-2	-2	-2	1	1	-1	-2	1	1	-7	
3	Fensterstege	-2	-2	1	2	-2	1	1	-2	-2	-1	-6	
4	Fenster	-1	-1	1	1	-2	-1	1	-1	-1	-1	-5	
5	Oberer Türbereich	-2	-2	-2	-2	-2	1	1	2	1	1	-4	
6	Voutenbereich	-2	-2	-1	-2	2	2	2	-2	-2	2	-3	
7	Tür	1	1	-2	-2	-2	-1	-1	2	1	1	-2	
8	Seitlicher Türbereich/Türsäulen	1	1	-2	-2	-2	-1	-1	2	1	1	-2	
9	Oberes Fensterband	-2	-2	1	1	-2	2	1	1	1	-1	0	
10	Übergang Seitenwand/Boden	2	1	-1	-1	-1	-1	-2	1	1	2	1	
11	Fahrzeugboden	2	2	-2	-2	2	2	-2	1	1	1	5	
12	Unteres Fensterband	2	1	1	1	-2	2	1	1	-1	2	8	
13	Untergestell	2	2	-1	1	2	2	-1	-1	2	1	9	
<p>2 = starker Einfluß, Submodul muss individuell angepasst werden</p> <p>1 = bei geeigneter Modulteilung oder einer entsprechenden Variantenbildung kann individ. Anpassung vermieden werden</p> <p>-1 = bei geeigneter Modulteilung nur geringen bis keinen Einfluss</p> <p>-2 = vorauss. keinen Einfluss</p>													free-to-design

**Tab. 8** Geordnete Matrix der Auswirkungen von Variationsanforderungen auf Submodule

### 6.1.3 Zuordnung von Bauweisen und Fertigungsverfahren

Zum Abschluss erfolgt eine Zuweisung von Bauweisen und Produktionsprozessen auf die Submodule. Es werden hierfür in den Spalten der Matrix verschiedene Bauweisen und zugehörige Produktionsprozesse aufgeführt, und diese im Anschluss hinsichtlich ihrer Eignung den Submodulen zugeordnet. Welche möglichen Bauweisen und Prozesse in der Matrix aufgeführt werden ist vom Hersteller entsprechend seiner Produktionsmöglichkeiten und seiner –strategie zu entscheiden. Im vorliegenden Beispiel werden die folgenden fünf gebräuchlichen Bauweisen im Schienenfahrzeugbau mit zugehörigen Produktionsprozessen aufgeführt:

- **1: Längsorientierte Integralbauweise (komplexe Geometrie, hoher Integrationsgrad):**

Die zugehörigen Komponenten weisen eine längsgerichtete, hochintegrale Baustruktur auf und werden in einem kontinuierlichen, produktiven Zieh- oder Pressprozess unter Einsatz eines oder mehrerer formgebender Matrizenwerkzeuge hergestellt. Der Integrationsgrad und die geometrische Komplexität der Komponenten sind hoch, d.h. das Einbringen von Kanälen, Befestigungsschienen, Verstärkungen und weiteren längsorientierten Funktionsträgern ist während des Fertigungsprozesses möglich. Eine Änderung des Werkzeugs ist aufgrund seiner hohen geometrischen Komplexität und seiner hohen Investitionskosten nicht vorgesehen. Geeignete Fertigungsverfahren sind das Extrusions- und Strangpressverfahren. Als Werkstoffe können Aluminium und FVK eingesetzt werden.

- **2: Längsorientierte Integralbauweise (einfache Geometrie, geringer Integrationsgrad):**

Die zugehörigen Komponenten weisen eine längsgerichtete, integrale Baustruktur auf und werden in einem kontinuierlichen, produktiven Zieh- oder Pressprozess unter Einsatz eines formgebenden Matrizenwerkzeugs hergestellt. Der Integrationsgrad der Komponenten ist niedrig. Geometrische Querschnittsänderungen sind in geringem Umfang über ein flexibles Werkzeug oder den Austausch des Werkzeugs möglich. Geeignete Fertigungsverfahren sind das Extrusions- und Strangpressverfahren. Als Werkstoffe können Aluminium und FVK eingesetzt werden.

- **3: Nicht-längsorientierte Integralbauweise (komplexe Geometrie, hoher Integrationsgrad):**

Die Komponenten weisen eine kompakte, hochintegrale Bauweise auf. Sie werden in einem diskontinuierlichen, zum Teil mehrstufigen Pressenprozess mit aufwendigen, dreidimensionalen Formwerkzeugen gefertigt. Aufgrund der Komplexität der Formwerkzeuge ist keine Änderung der Werkzeuge in Folge einer Variationsanforderung vorgesehen. Als Werkstoffe kommen Stahl, Aluminium und FVK zum Einsatz.

- **4: Nicht-längsorientierte Integralbauweise (einfache Geometrie, geringer Integrationsgrad):**

Die Komponenten weisen eine kompakte, integrale Bauweise auf. Sie werden in einem diskontinuierlichen Pressenprozess mit einfachen, geometrisch weniger

komplexen Formwerkzeugen gefertigt. Die Formwerkzeuge können in Grenzen zur Herstellung von Geometrievarianten flexibel variiert werden. Als Werkstoffe kommen Stahl, Aluminium und FVK zum Einsatz.

- **5: Differentialbauweise:**

Die Komponenten werden durch das Umformen und Fügen von standardisierten Halbzeugen gefertigt. Sie weisen stets einen hohen Anteil erforderlicher Montage-tätigkeiten und einen geringen Integrationsgrad auf. Die Herstellung der Kompo-nenten erfolgt in mehreren, zum Teil manuell ausgeführten Fertigungs- und Montageschritten. Aufgrund der Bauweise ist eine sehr hohe Geometrie- und Werkstoffflexibilität möglich. Als Werkstoffe kommen Stahl, Aluminium und FVK zum Einsatz.

Aus der Zuordnung der beschriebenen Bauweisen und Prozessen auf die Submodu-le ergibt sich die untenstehende Matrix (Tab. 9). Die Zuordnung erfolgt durch die Vergabe von Eignungswerten zwischen eins und null und erfolgt unter Berücksichti-gung von Kernkompetenzen des Herstellers, einer herstellerseitig vorgesehenen Variantenbildung und der Einbindung von Zulieferern. Die Matrix ist derart aufgebaut, dass die Produktivität der Bauweisen und Produktionsprozesse von links nach rechts abnimmt, die Flexibilität dagegen zunimmt. Aus der Multiplikation der Eignungswerte mit einem den Bauweisen und Prozessen zugeordnetem Produktivitätsgrad in Punk-ten, der von eins (flexibel) bis fünf (produktiv) reicht, wird der in der Matrix rechts stehende Produktivitätsindex gebildet.

Je höher dieser Index ist, desto eher lässt sich das entsprechende Submodul mit produktiven Fertigungsverfahren fertigen, desto aufwendiger ist jedoch die Umset-zung geometrischer Änderungswünsche, die in der Regel umfangreiche Werkzeug-änderungen bedingt.

abnehmende Produktivität / geringere Integration											
Bauweise / Prozess  Produktivitätsgrad in Punkten  Submodule	1		2		3		4		5		Produktivitätsindex
	längs-orientierte Integralbauweise (komplex), nur Längenflexibilität 5 Punkte	bewertetes Ergebnis	längs-orientierte Integralbauweise (einfach), beschränkte Flexibilität 4 Punkte	bewertetes Ergebnis	komplexe, Integralbauweise, Pressenteil, keine Varianten 3 Punkte	bewertetes Ergebnis	Integralbauweise, Pressenteil, definierte Variantenvielfalt 2 Punkte	bewertetes Ergebnis	Differentialbauweise, Montage-teil, höchste Flexibilität 1 Punkt	bewertetes Ergebnis	
1 Dachbereich	3	15	3	12	1	3	1	2	1	1	33
2 Fahrzeugboden	1	5	2	8	0	0	2	4	2	2	19
3 Fahrzeugkopf	0	0	1	4	0	0	1	2	3	3	9
4 Fenster	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	n.b.
5 Fensterstege	3	15	3	12	0	0	2	4	2	2	33
6 Oberer Türbereich	3	15	3	12	0	0	2	4	2	2	33
7 Oberes Fensterband	3	15	3	12	0	0	2	4	2	2	33
8 Seitlicher Türbereich/Türsäulen	3	15	3	12	0	0	2	4	1	1	32
9 Tür	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	n.b.
10 Übergang Seitenwand/Boden	1	5	2	8	0	0	2	4	3	3	20
11 Unteres Fensterband	1	5	2	8	0	0	2	4	2	2	19
12 Untergestell	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3
13 Voutenbereich	1	5	2	8	0	0	1	2	2	2	17
3 = gut geeignete Bauweise / Prozess 2 = kann mit Einschränkungen in dieser Bauweise ausgeführt werden 1 = erhebliche Einschränkungen - wenig geeignete Bauweise / Prozess 0 = ungeeignete Bauweise / Prozess n.b. = nicht bewertet											

**Tab. 9** Zuordnungsmatrix von Bauweisen und Prozessen

Diese Matrix kann nun nach dem Produktivitätsindex geordnet werden (Tab. 10). Aus dieser Ordnung kann eine Einteilung der Submodule in Basis- und free-to-design-Module abgeleitet werden. Das Festlegen der Grenze der Matrix zwischen Basis- und Variationsmodulen lässt sich einerseits aus den Ergebnissen der Topologie- und der Variationsmatrix als auch nach herstellerspezifischen Kriterien vorzunehmen, die sich u.a. aus Fertigungsmöglichkeiten, Unternehmensstrategien und Marktgegebenheiten ergeben.

abnehmende Produktivität / geringere Integration											
Bauweise / Prozess  Produktivitätsgrad in Punkten  Submodule	1		2		3		4		5		Produktivitätsindex
	längs-orientierte Integralbauweise (komplex), nur Längenflexibilität 5 Punkte	bewertetes Ergebnis	längs-orientierte Integralbauweise (einfach), beschränkte Flexibilität 4 Punkte	bewertetes Ergebnis	komplexe, Integralbauweise, Pressenteil, keine Varianten 3 Punkte	bewertetes Ergebnis	Integralbauweise, Pressenteil, definierte Variantenvielfalt 2 Punkte	bewertetes Ergebnis	Differentialbauweise, Montage-teil, höchste Flexibilität 1 Punkt	bewertetes Ergebnis	
1 Dachbereich	3	15	3	12	1	3	1	2	1	1	33
2 Fensterstege	3	15	3	12	0	0	2	4	2	2	33
3 Oberer Türbereich	3	15	3	12	0	0	2	4	2	2	33
4 Oberes Fensterband	3	15	3	12	0	0	2	4	2	2	33
5 Seitlicher Türbereich/Türsäulen	3	15	3	12	0	0	2	4	1	1	32
6 Übergang Seitenwand/Boden	1	5	2	8	0	0	2	4	3	3	20
7 Fahrzeugboden	1	5	2	8	0	0	2	4	2	2	19
8 Unteres Fensterband	1	5	2	8	0	0	2	4	2	2	19
9 Voutenbereich	1	5	2	8	0	0	1	2	2	2	17
10 Fahrzeugkopf	0	0	1	4	0	0	1	2	3	3	9
11 Untergestell	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3
12 Fenster		0		0		0		0		0	n.b.
13 Tür		0		0		0		0		0	n.b.

3 = gut geeignete Bauweise / Prozess  
 2 = kann mit Einschränkungen in dieser Bauweise ausgeführt werden  
 1 = erhebliche Einschränkungen - wenig geeignete Bauweise / Prozess  
 0 = ungeeignete Bauweise / Prozess  
 n.b. = nicht bewertet

free-to-design | Basismodule

Tab. 10 Sortierte Zuordnungsmatrix von Bauweisen und Prozessen

### 6.1.4 Vergleich der Matrizen und Ableitung der Basis- und Variationsmodule

Aus den in den Kapiteln 6.1.1 – 6.1.3 erstellten Matrizen lassen sich nun durch einen Vergleich die Submodule in größere und komplexere Wagenkastenmodule überführen sowie die endgültigen Basis- und Variationsmodule ableiten. Wie in Kapitel 5.4.4 beschrieben, muss sich aus dem Vergleich der Matrizen keine eindeutige Lösung ergeben. Ist dies der Fall, so ist der Gliederungsprozess mit einer geänderten Submodulbildung erneut zu durchlaufen und die Matrizen sind entsprechend neu zu erstellen. Nachfolgend werden die Ergebnisse der einzelnen Matrizen aus den Kapiteln 6.1.1 – 6.1.3 hinsichtlich der Bildung der möglichen Wagenkastenmodule, im Folgenden kurz Modul, nochmals zusammengestellt:

**Topologie (Matrix 1):** Aus der Matrix der topologischen Relation lassen sich folgende Submodule zu Modulen zusammenfassen:

Modul 1:	Untergestell + Fahrzeugboden
Modul 2:	Dach + Voutenbereich
Modul 3:	Oberes Fensterband + Fenster + unteres Fensterband + Fensterstege
Modul 4:	Oberer Türbereich + Tür + seitlicher Türbereich (Türsäulen)

Die Submodule *Kopf* und *Übergang Seitenwand/Boden* können anhand der Topologiematrix nicht eindeutig zugeordnet werden.

**Variationsanforderungen (Matrix 2):** Aus der Matrix der Auswirkungen von Variationsanforderungen auf Submodule ergeben sich folgende Basis- und Variationsmodule:

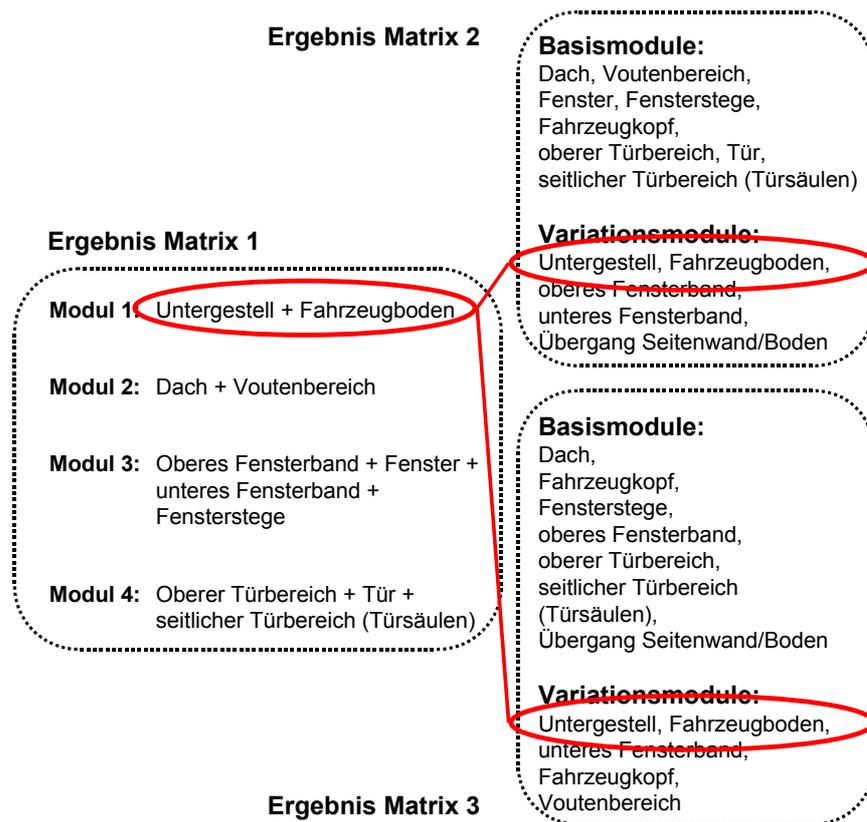
Basismodule:	Dach, Voutenbereich, Fenster, Fensterstege, Fahrzeugkopf, oberer Türbereich, Tür, seitlicher Türbereich (Türsäulen)
Variationsmodule:	Untergestell, Fahrzeugboden, oberes Fensterband, unteres Fensterband, Übergang Seitenwand/Boden

**Bauweisen und Prozesse (Matrix 3):** Die Matrix zur Zuordnung von Bauweisen und Prozessen auf Submodule besitzt folgendes Ergebnis:

Basismodule:	Dach, Fensterstege, Fahrzeugkopf, oberer Türbereich, seitlicher Türbereich (Türsäulen), oberes Fensterband, Übergang Seitenwand/Boden
Variationsmodule:	Untergestell, Fahrzeugboden, unteres Fensterband, Fahrzeugkopf, Voutenbereich

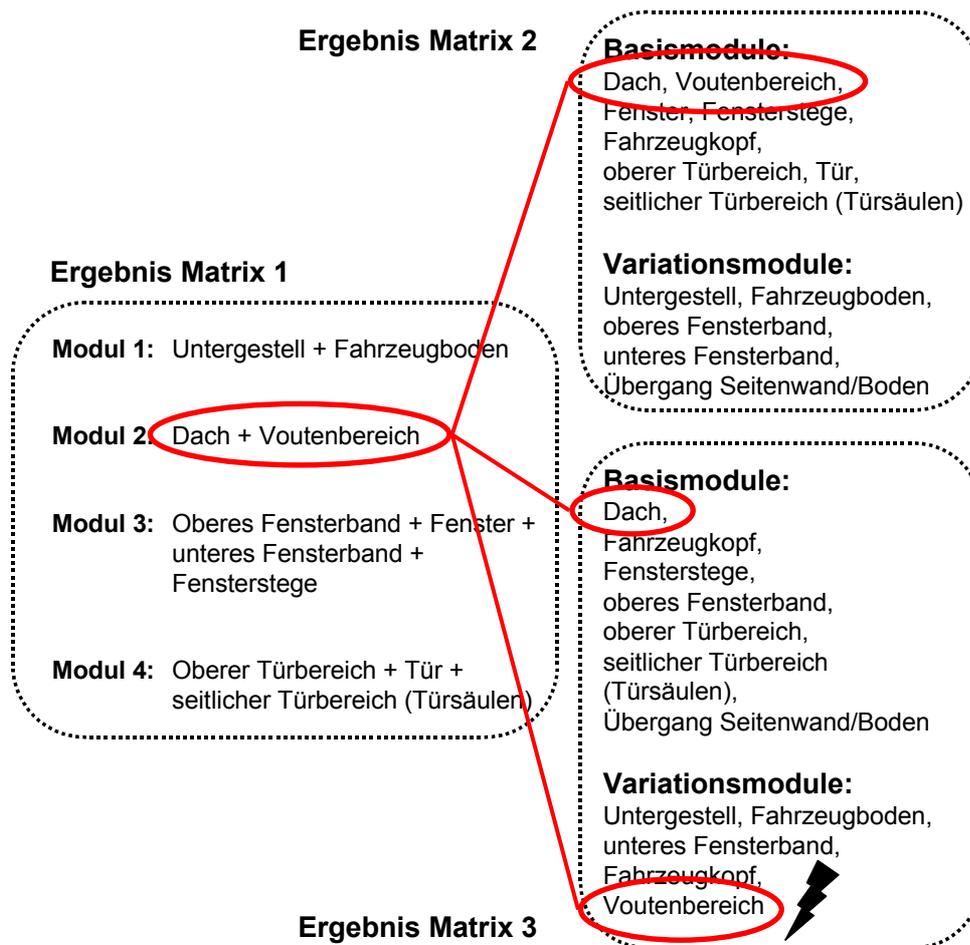
Durch die Integration der Ergebnisse der drei Matrizen lässt sich nun eine Modulteilung des Wagenkastens ableiten (Bild 64 bis Bild 67).

1. Das Modul „*Fahrzeugboden*“ entsteht dabei als *Variationsmodul* aus der Zusammenlegung des *Untergestells* und des *Fahrzeugbodens* (Bild 64). Die mögliche Zusammenlegung dieser Submodule ergibt sich aus der topologischen Relationsmatrix. Sowohl in der Matrix 2 als auch in der Matrix 3 werden diese Submodule beide als *Variationsmodule* definiert. Die Integration der drei Matrizen ergibt widerspruchsfrei das obige Ergebnis.



**Bild 64** Bildung des Variationsmoduls „Fahrzeugboden“

2. Das Modul „Dachmodul“, entsteht aus den Submodulen *Dach* und *Voutenbereich* als *Basismodul* (Bild 65). Hier kommt es jedoch zu einem Widerspruch zwischen den Matrizen 2 und 3. Aus der Bauweisen- und Prozessmatrix geht das Voutensubmodul als Variationsmodul aufgrund der schlechteren Eignung für hochintegrale, längsorientierte Bauweisen hervor. Da jedoch der Voutenbereich mit Einschränkungen auch in der selben Bauweise wie das Dach ausgeführt werden kann und keine weiteren Widersprüche bestehen, ist es möglich, diese beiden Submodule zu einem Basismodul zusammenzuführen. Aufgrund der aus der Matrix „Auswirkungen der Variationsanforderungen“ relativ hohen geforderten Flexibilität des Submoduls Voutenbereich, die aus der Nähe zur Grenze zum free-to-design-Bereich zu ersehen ist, sollten für dieses Modul anbieterspezifische Varianten vorgesehen werden.



**Bild 65** Bildung des Basismoduls „Dach“

- Die Ableitung des *dritten Moduls* gestaltet sich nicht eindeutig, da die aus der Matrix 1 für eine Zusammenlegung geeigneten Submodule in den Matrizen 2 und 3 zum Teil als Basis- als auch als Variationsmodule eingeordnet werden (Bild 66). Es wird in diesem Fall das Variationsmodul „*Seitenwand*“ aus den Submodulen *oberes Fensterband, Fenster, Fensterstege und unteres Fensterband* gebildet. Die Einordnung als Variationsmodule wird aus der Tatsache abgeleitet, dass die Fensterbänder als Variationsmodule aus der Matrix 2 hervorgehen und eine mögliche Variation der Fenstergeometrie als Wettbewerbsvorteil eingeschätzt wird. Da das obere Fensterband auch in einer flexiblen Differentialbauweise ausgeführt werden kann, ist eine Integration in das Variationsmodul möglich.

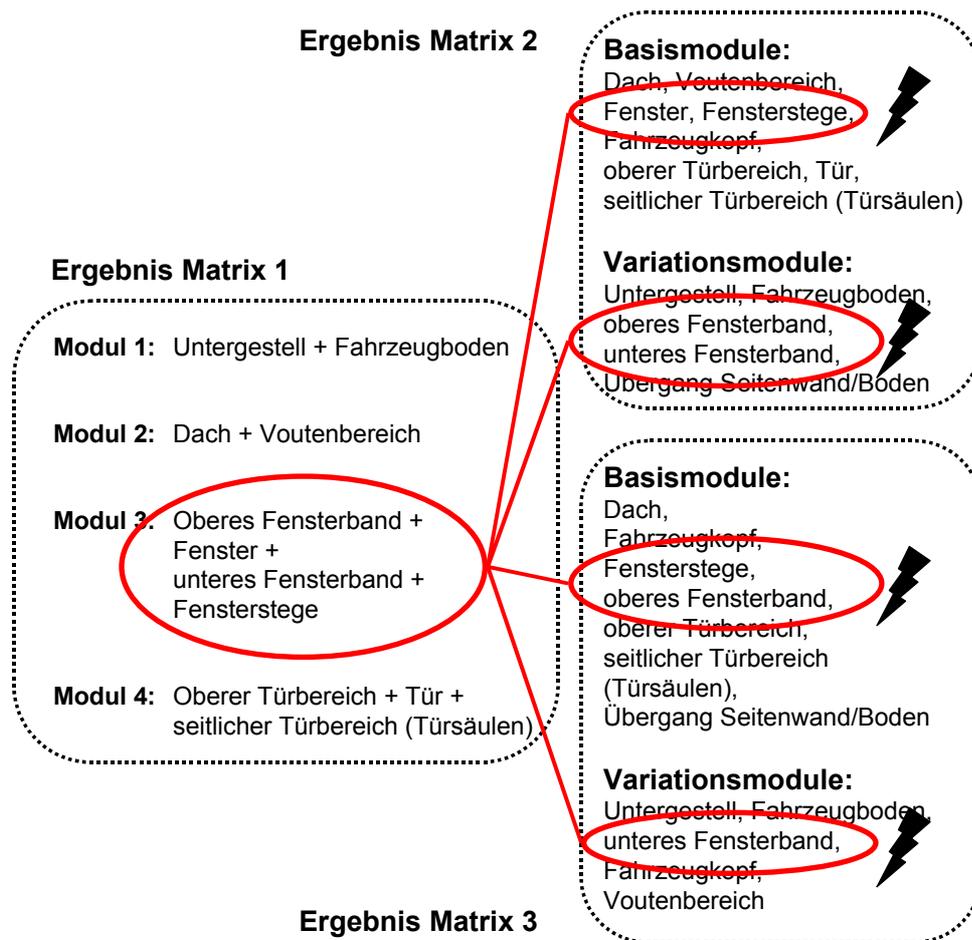


Bild 66 Bildung des Variationsmoduls „Seitenwand (Fensterbereich)“

4. Die Bildung des *vierten Moduls* erscheint aufgrund der widerspruchsfreien Ergebnisse der drei Matrizen als eindeutig: Das *Basismodul* „Tür“ umfasst die Submodule *Tür*, *oberer Türbereich* und *seitliche Türbereiche (Türsäulen)* (Bild 67).

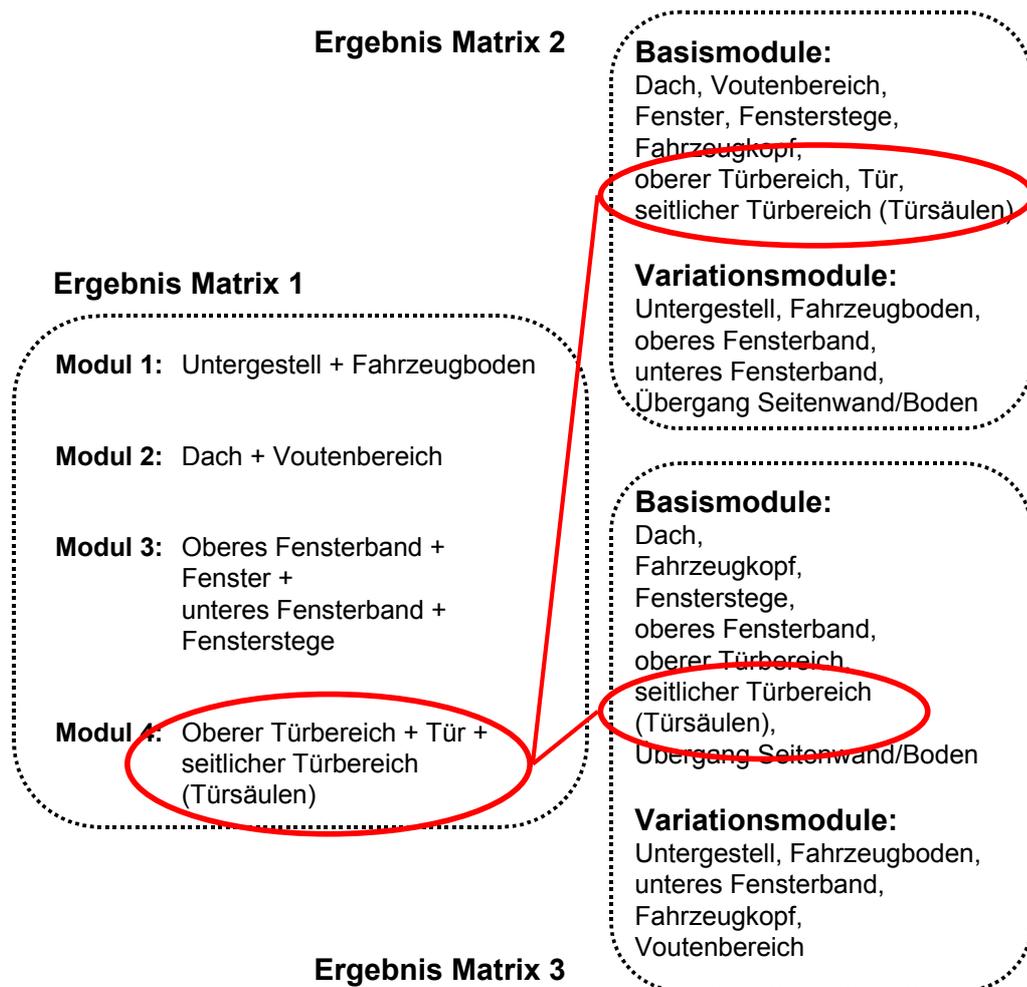


Bild 67 Bildung des Basismoduls „Türmodul“

- Die Submodule *Fahrzeugkopf* und *Übergang Seitenwand / Boden* lassen sich aus den Matrizen nicht eindeutig zuordnen, da sie aus den Matrizen „*Auswirkungen der Variationsanforderungen*“ und „*Bauweisen und Prozesse*“ einmal als Basis- und einmal als Variationsmodule hervorgehen. Für diesen Fall kann kein eindeutiges Ergebnis erzielt werden. Es werden hier beide Submodule als Variationsmodule eingeordnet, um eine größere Flexibilität des gesamten *PC*-Konzeptes zu ermöglichen.

Als letzten Schritt ist entsprechend der Ausführungen in Kapitel 5.4.3.1 der Integrationsgrad der Basismodule zu maximieren. Das bedeutet, dass weitere Funktionen und zugehörige Funktionsträger des Wagenkastens in die Basismodule zu integrieren sind. Es ist dabei zu prüfen, ob eine Integration von Funktionsträgern, wie beispielsweise Befestigungspunkte und –schiene sowie Klimakanäle, innerhalb des Fertigungsprozesses erreicht werden kann. Zur methodischen Vorgehensweise für

die Integration mehrerer Funktionen in Funktionsträger existieren in der Literatur verschiedene Ansätze. An dieser Stelle wird auf entsprechende wissenschaftliche Arbeiten verwiesen, die sich mit Modularisierung und der Integration von Funktionen in Module beschäftigen [ERX98, GÖP98, SUH99].

## **6.2 Realisierungsansatz „Modulare Hybridbauweise“**

### **6.2.1 Konzept und Ziele**

Unter der Bezeichnung „Modulare Hybridbauweise“ wurde in Zusammenarbeit mit dem Schienenfahrzeughersteller Bombardier Transportation Talbot mit Sitz in Aachen ein modulares Konzept für ein Regional-Schienenfahrzeug entwickelt und umgesetzt, das dem beschriebenen Ansatz der Process Customization folgt. Die Motivation für dieses Projekt resultierte aus den geringen Fertigungsstückzahlen bei Regionalbahnen und dem bisher hohen Anteil fahrzeugspezifischer Konstruktionen und Vorrichtungen, der eine wirtschaftliche Herstellung der Fahrzeuge erschwerte [ALT92, ALT99]. Die Bauweise dieses Fahrzeugkonzeptes stellt eine vollständige Abkehr von der konventionellen geschlossenen Röhrenbauweise dar und gliedert die komplette Fahrzeugstruktur in einzelne, separat zu fertigende und vormontierbare, flächenhafte Module, aus denen erst in einem späten Stadium der räumliche Wagenkasten entsteht. Die Bezeichnung „Hybridbauweise“ beschreibt dabei zum einen das Mischsystem des Wagenkastens bestehend aus Basis- und Variationsmodulen zum anderen die optional gezielt einzusetzende Kombination von Werkstoffen. Die vorrangigen Ziele dieser modularen Bauweise sind nachfolgend zusammengestellt [STI98]:

- Auflösung der fertigungstechnischen Trennung und seriellen Fertigungsfolge Rohbau/Innenausbau durch abgeschlossene, vormontierbare Moduleinheiten und damit eine Reduzierung der Durchlaufzeiten durch Prozessparallelisierung in der Fertigung, der Montage und dem Innenausbau der einzelnen Module,
- Generierung eines anbieterseitigen Modulbaukastens zur Konfektionierung von Produktvarianten aus Standardmodulen und auftragsspezifischen Modulen,
- Erhöhung der Flexibilität gegenüber Kundenwünschen durch flexible gestaltbare Module, variable Prozesse und geschlossene, IT-unterstützte Prozessketten (CAD/CAM),
- Einsatz moderner, flexibler Fertigungstechnologien für kundenspezifisch anzupassende Strukturmodule,
- Reduzierung der Fixkosten durch den weitgehenden Wegfall produktspezifischer Vorrichtungen und starrer Betriebsmittel,

- Ermöglichung auftragsentkoppelter Vorfertigung von variationsarmen Strukturmodulen zur Verkürzung der time-to-market,
- Erhöhung der Fähigkeiten für das Exportgeschäft unter Berücksichtigung von Local-Content-Bedingungen durch Lieferung des Fahrzeugs als Modulbausatz,
- Schneller Austausch beschädigter Module im Reparaturfall sowie eine mögliche Umrüstung des Fahrzeugs an geänderte Betriebsbedingungen (Bild 72),
- Ermöglichung eines flexiblen, belastungsgerechten Werkstoffeinsatzes und weitgehende Nutzung des Konzept-Leichtbaus.

### 6.2.2 Aufbau und Fertigung

Zur Strukturierung des Wagenkastens wurde in der Konzeptfindungsphase das Vorgehen zur Generierung des Mischsystems eingesetzt, um eine geeignete Modulteilung sowie eine Gliederung in Basis- und Variationsmodule zu erhalten. Der Gliederungsprozess führte zu einer längsorientierten Teilung des Wagenkastens, die schematisch in Bild 68 dargestellt ist. Die längsorientierte Modulteilung ermöglicht eine geringere Schnittstellenzahl sowie eine leichtere Integration von längsgerichteten Luftkanälen, Verrohrungen, Leitung etc. Zur Vereinfachung der Montage können die wagenkastenlangen, wenig biegesteifen Module mit einem Hilfsrahmen versehen werden, der nach erfolgter Montage der Module zum Wagenkasten entfernt wird.

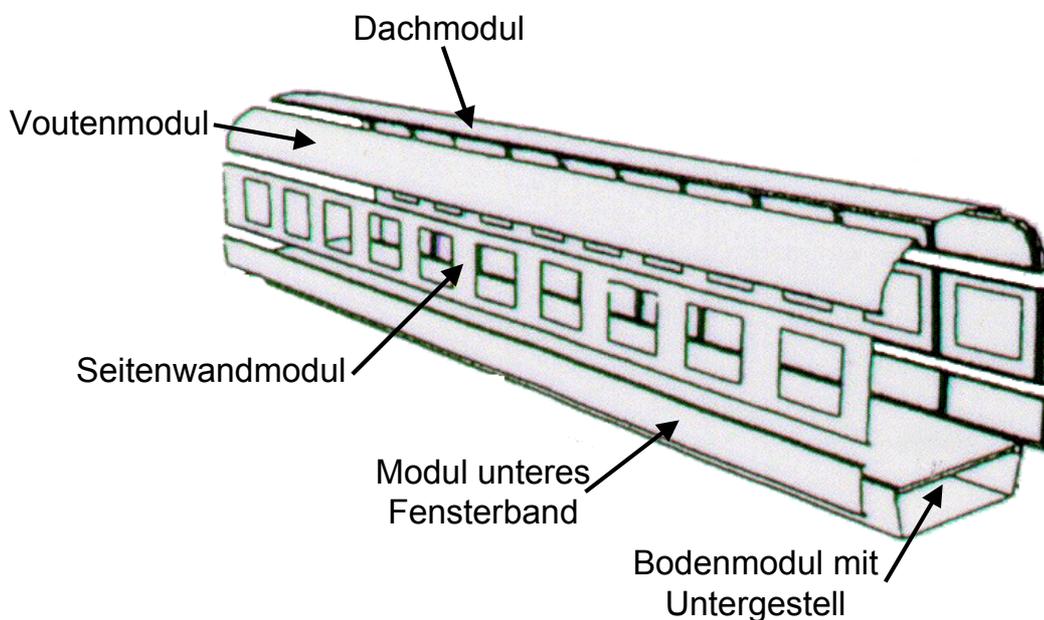


Bild 68 Längsorientierte Modulteilung im Vorhaben „Modulare Hybridbauweise“ [ALT99]

Die Bauweise des Fahrzeugs bzw. der Module erfolgte in einer Stahldifferentialbauweise unter Nutzung von Standard-Rechteckprofilen, wodurch ein geringer Anteil erforderlicher produktspezifischer Vorrichtungen erzielt werden konnte.

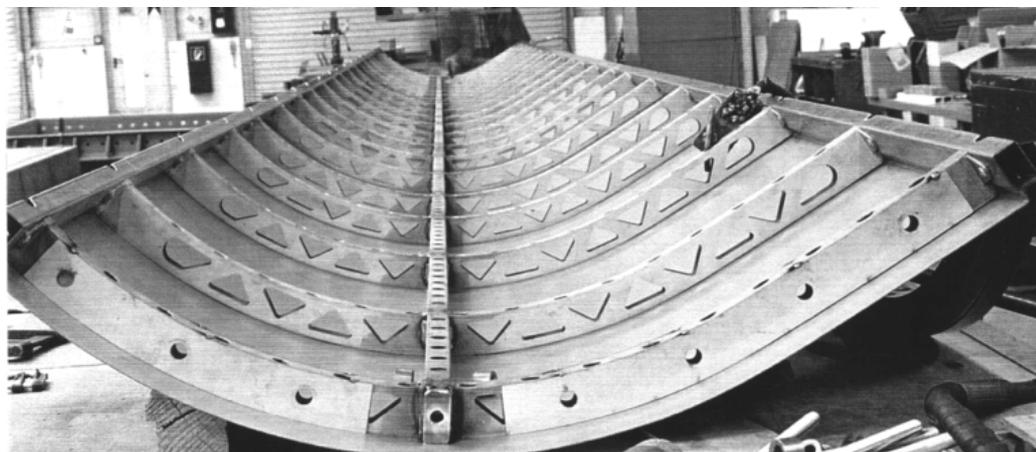


Bild 69 Wagenkastenmodule in Stahl-Differentialbauweise aus Standardprofilen [Bombardier Transportation]

Die Wagenkastenmodule wurden derart gestaltet, dass eine weitgehende Komplettierung der Module einschließlich des Innenausbaus, der Verkabelung und Verrohrung erfolgen konnte.

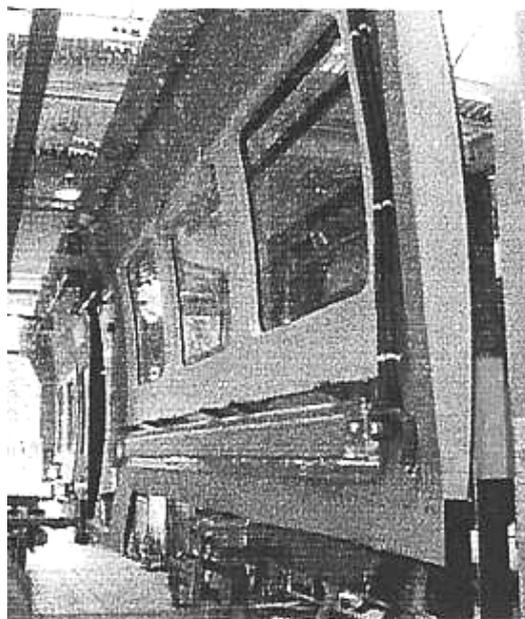


Bild 70 Weitgehend vormontiertes Seitenwandmodul (Innenansicht) [Bombardier Transportation]

Nach Montage der Module zum Wagenkasten vervollständigen nur noch Komplettierungs- und Prüfarbeiten die Arbeiten am Fahrzeug. Die Montage der einzelnen Strukturmodule erfolgte in einer Kaltfügetechnik über sog. Schließringbolzen, die über einen speziellen Koppelfuß zur Verschweißung mit den Stahlprofilen der Differentialbauweise eine dynamisch hochbelastbare form- und kraftschlüssigen Verbindung der Module ermöglichte (Bild 71). Der Einsatz von Kaltfügetechniken war die Voraussetzung für eine weitgehende Vormontage der Module mit Komponenten der Innenverkleidung. Diese Fügetechnik gewährleistet eine sehr steife, vorgespannte Anbindung der Module, die über hydraulische Montagewerkzeuge schnell gefügt und leicht wieder getrennt werden kann.

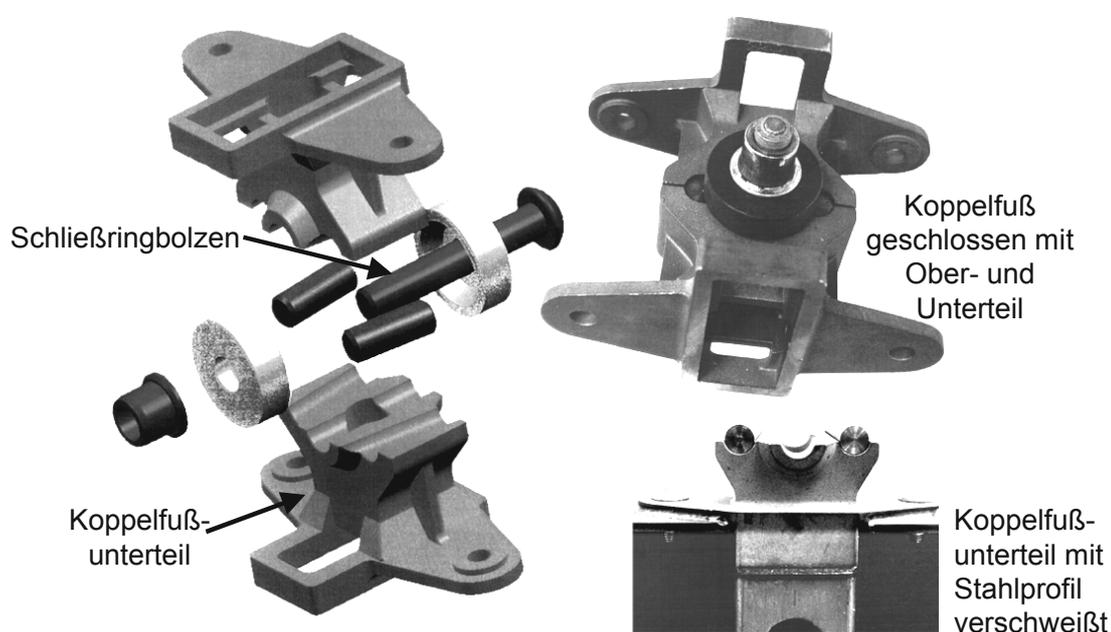
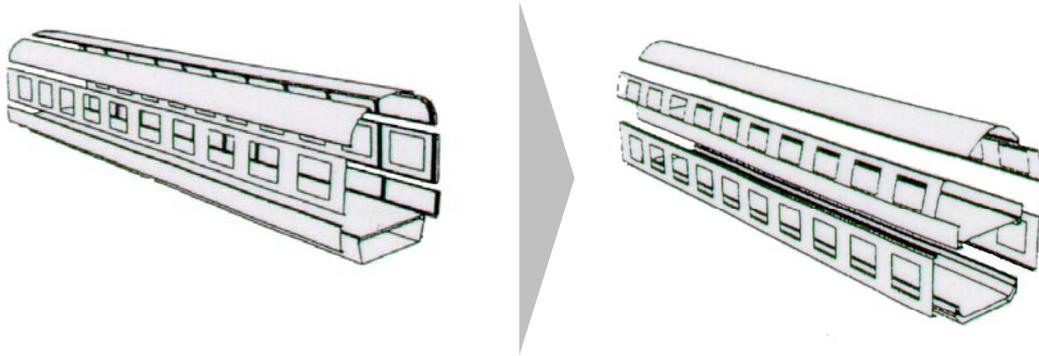


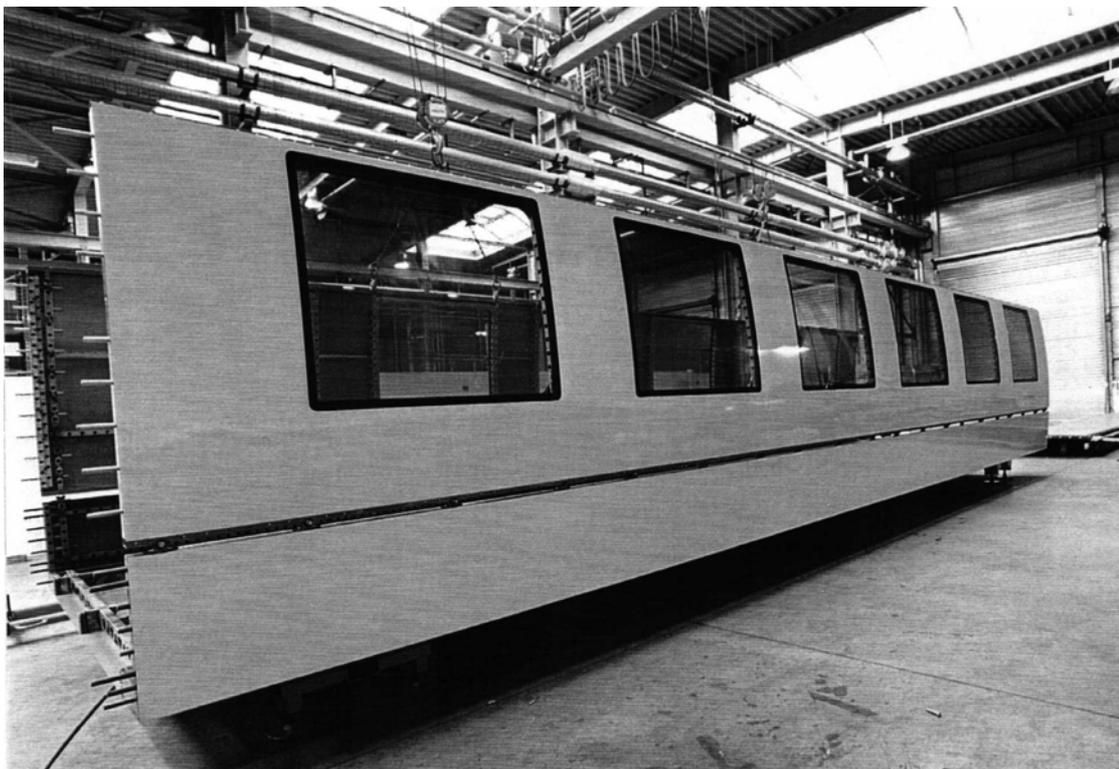
Bild 71 Patentierter Koppelfuß zur Montage der Strukturmodule [Bombardier Transportation]

Darüber hinaus sollte mit dem Konzept eine einfache und schnelle Umrüstung des Fahrzeugkonzeptes an geänderte Kapazitäts- und Einsatzanforderungen des Betreibers durch den Austausch kompletter Module ermöglicht werden (Bild 72).



**Bild 72** Anpassung des Fahrzeugs an geänderte Kapazitäts- und Einsatzbedingungen durch Modulaustausch [ALT99]

Als *Basismodule* des Konzeptes wurden über die Mischsystembildung die Seitenwände einschließlich der Fenster sowie das untere Fensterband definiert (Bild 73).



**Bild 73** Seitenwand und unteres Fensterband als Basismodule [Bombardier Transportation]

Für die Basismodule wurde ein Fließfertigungskonzept erarbeitet, in dem diese auftragsunabhängig vorgefertigt, komplettiert, geprüft und bei Auftragseingang der



Durch die Gestaltung der Basismodule in einer Stahl-Differentialbauweise konnten die Voraussetzungen für den optionalen Einsatz alternativer Werkstoffe geschaffen werden. So wurde zur Erhöhung des Leichtbaugrades sowohl der Einsatz von FVK in der tragenden Struktur als auch zur Beplankung der Basismodule vorgesehen.

Die kundenspezifische Anpassung der Fahrzeuge erfolgte über die *Variationsmodule* Untergestell/Boden, Voute und Dach (Bild 76). Durch diese Module lassen sich geometrisch sowohl die Fahrzeughöhe und Breite, als auch der Fahrzeugquerschnitt, beispielsweise zur Umsetzung einer Neigetechnikoption, variieren.

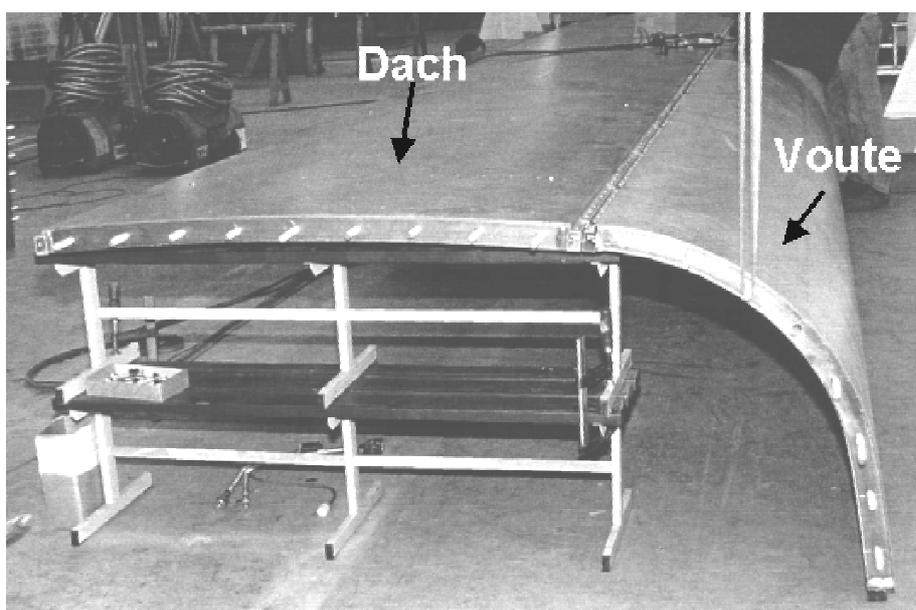


Bild 75 Variationsmodule Voute und Dach [Bombardier Transportation]

Die Fertigung der Variationsmodule erfolgte über flexible, numerisch gesteuerte Fertigungsverfahren, wie dem CNC-Biegen und dem Laserschneiden und -schweißen, die eine schnelle und wirtschaftliche geometrische Variation der Profile und Spanten bzw. der kompletten Module nach Kundenwünschen ermöglichten. Zur nachfolgenden Beplankung der Skelettstruktur wurden auf Coils gelagerte Bleche eingesetzt, die sich der Kontur der tragenden Skelettstruktur anpassten.

Darüber hinaus wurden für bestimmte Basismodule, wie den Seitenwänden, anbieterseitige Varianten vorgesehen, die eine Umsetzung veränderter Wagenkastenquerschnitte und die Bildung von Doppelstockfahrzeugen ohne eine Änderung des Gesamtfahrzeugkonzeptes ermöglichten.

Die auftragsspezifische Konfiguration des Gesamtfahrzeugs erfolgte gemäß des Konzepts der Process Customization durch die Kombination von Basis- und Variationsmodulen (Bild 76).



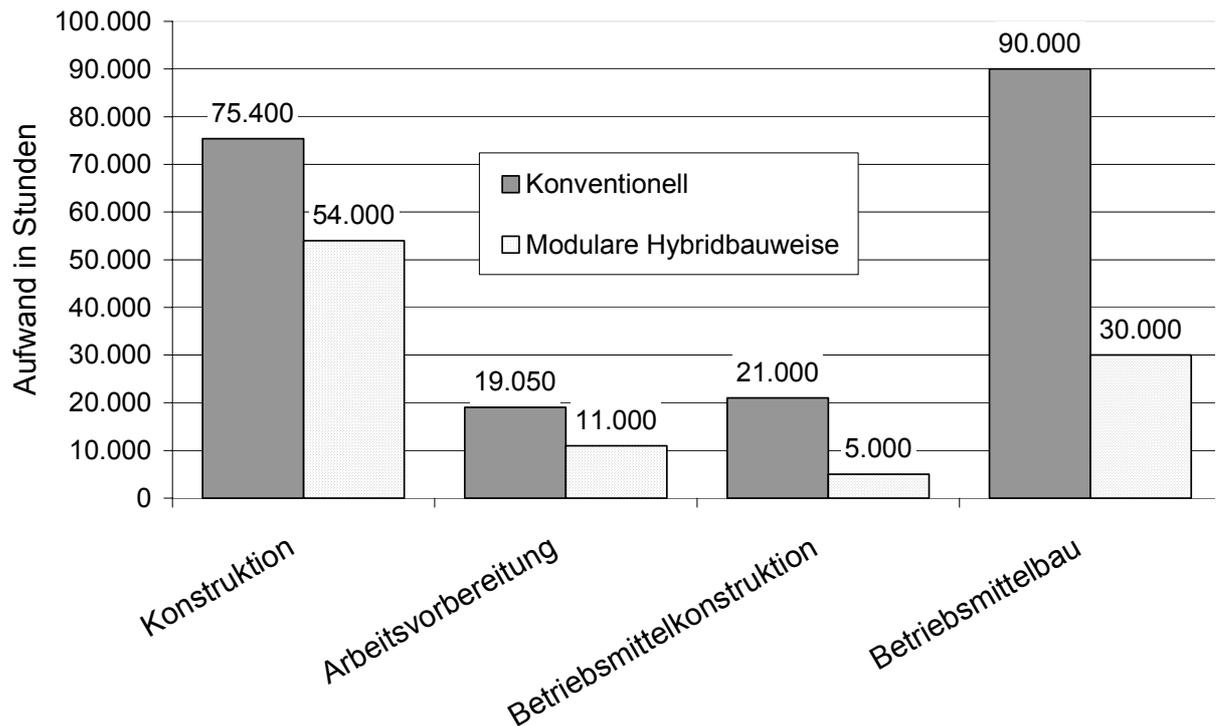
Bild 76 Auftragsspezifische Fahrzeugkonfiguration durch die Kombination von Basis- und Variationsmodulen [Bombardier Transportation]

### 6.2.3 Ergebnisse

Erste vorliegende Ergebnisse der modularen Hybridbauweise beziehen sich auf die Verkürzung der Durchlaufzeit durch die modulare Wagenkastenstruktur und die Reduktion der Produktionskosten. Ein quantitativer Nachweis zur Erhöhung der Kundenorientierung kann an dieser Stelle noch nicht gebracht werden.

#### 6.2.3.1 Zeiten

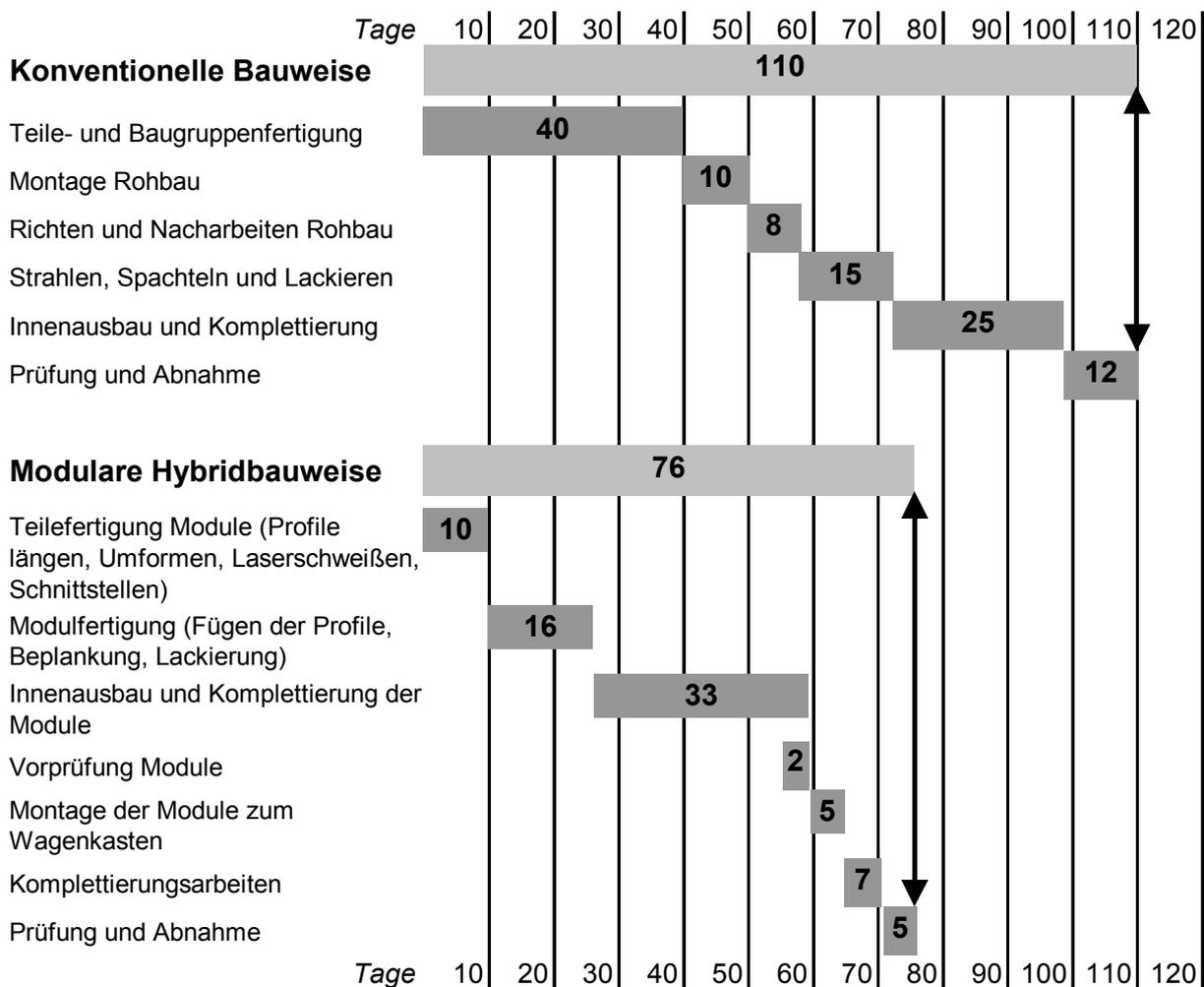
In einer ersten Analyse konnte eine deutliche Verkürzung des Aufwandes in der Arbeitsvorbereitung erzielt werden (Bild 77). Bei der Gegenüberstellung wurde davon ausgegangen, dass bereits Erfahrungen mit modularen Produktstrukturen vorhanden sind und eine angepasste Fabrikinfrastruktur einschließlich entsprechender Montagewerkzeuge und –hilfsmittel vorliegt. Weiterhin wurde bei dem Vergleich vorausgesetzt, dass geschlossene CAD/CAM-Prozessketten zwischen der Produktionsvorbereitung und der Produktion bestehen, die kurzfristige Änderungen von Produkt- und Prozessparametern ermöglichen. Hervorzuheben ist die erreichte, deutliche Reduzierung der Aufwendungen für die Produktionsvorbereitung in der Betriebsmittelkonstruktion und im Betriebsmittelbau als wesentliches Ziel der Modularen Hybridbauweise (Bild 77).



**Bild 77** Vergleich des Aufwands in der Produktionsvorbereitung in Stunden für ein Regionalschienefahrzeug

Die Durchlaufzeit in den Bereichen Fertigung und Endmontage konnte unter Nutzung der Potenziale der modularen Bauweise im Vergleich um knapp 30% reduziert werden (Bild 78). Diese Verkürzung resultiert vorrangig aus

- der weitgehenden Parallelisierung der Konstruktion, Fertigung und Montage der einzelnen Module,
- der frühen Integration des Innenausbaus mit hoher Ergonomie der Montageprozesse,
- dem Entfall von umfangreichen, durch thermischen Verzug bedingten Nacharbeiten in Folge der Nutzung von Kalfügetechniken,
- der Reduzierung der Rüstzeiten durch standardisierte Prozesse und flexible Betriebsmittel sowie aus
- der Verkürzung von auftragsspezifischen Applikationsarbeiten in der Entwicklung durch Nutzung standardisierter Basismodule.



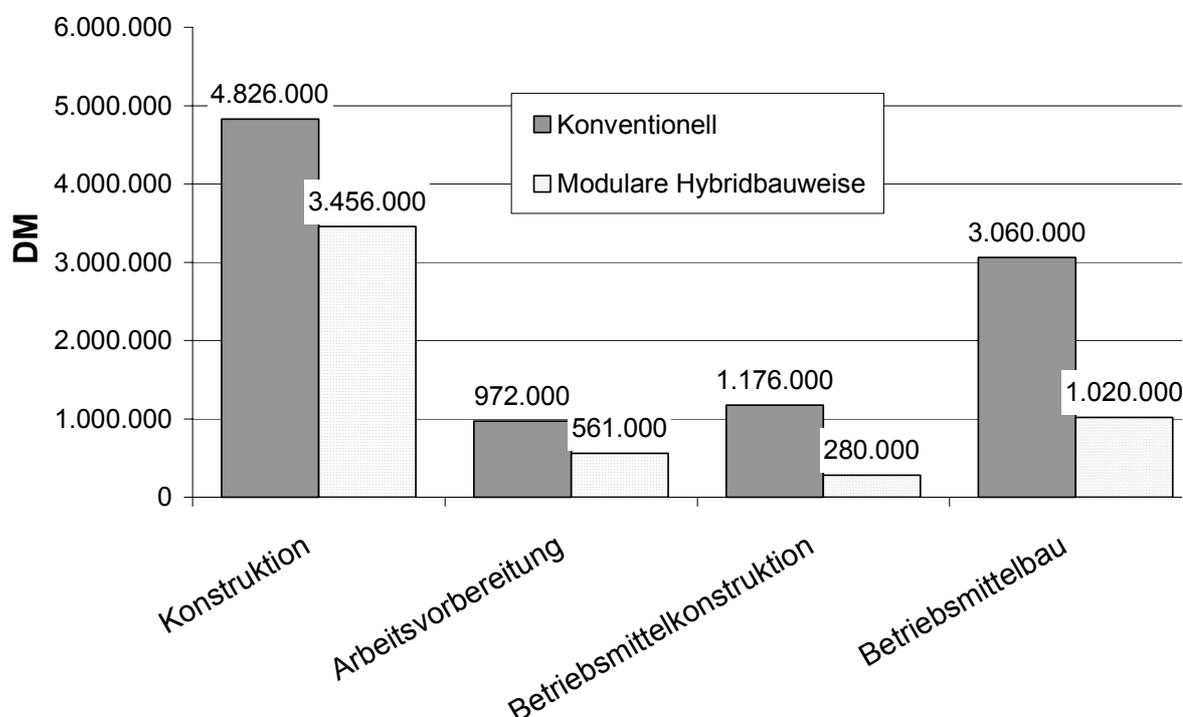
**Bild 78** Vergleich der Durchlaufzeiten in der Fertigung und Montage für ein Regionalschienefahrzeug

Die angegebenen Durchlaufzeiten beziehen sich auf die Fertigung eines kompletten Fahrzeugs nach Auftragseingang. Die konsequente Nutzung der Vorteile des PC-Konzeptes durch eine auftragsentkoppelte Fertigung der Basismodule und die Begrenzung der Entwicklungs-, Produktionsvorbereitungs- und Fertigungsprozesse auf die Variationsmodule lässt eine weitere Verkürzung der Prozesse in der Produktionsvorbereitung und der Fertigung erwarten. Die tatsächliche Höhe der weiteren Verkürzung der Prozesse richtet sich nach dem Anteil der Basismodule und dem Anpassungsaufwand für die Variationsmodule. Da sich das dargestellte Fahrzeug der Bombardier Transportation Talbot während der Anfertigung dieser Arbeit noch in einem Prototypenstatus befand, können zu den Aufwendungen für auftragsbezogene Anpassungen der Variationsmodule sowie zur nachfolgenden Fahrzeugkonfiguration keine weiteren Angaben gemacht werden.

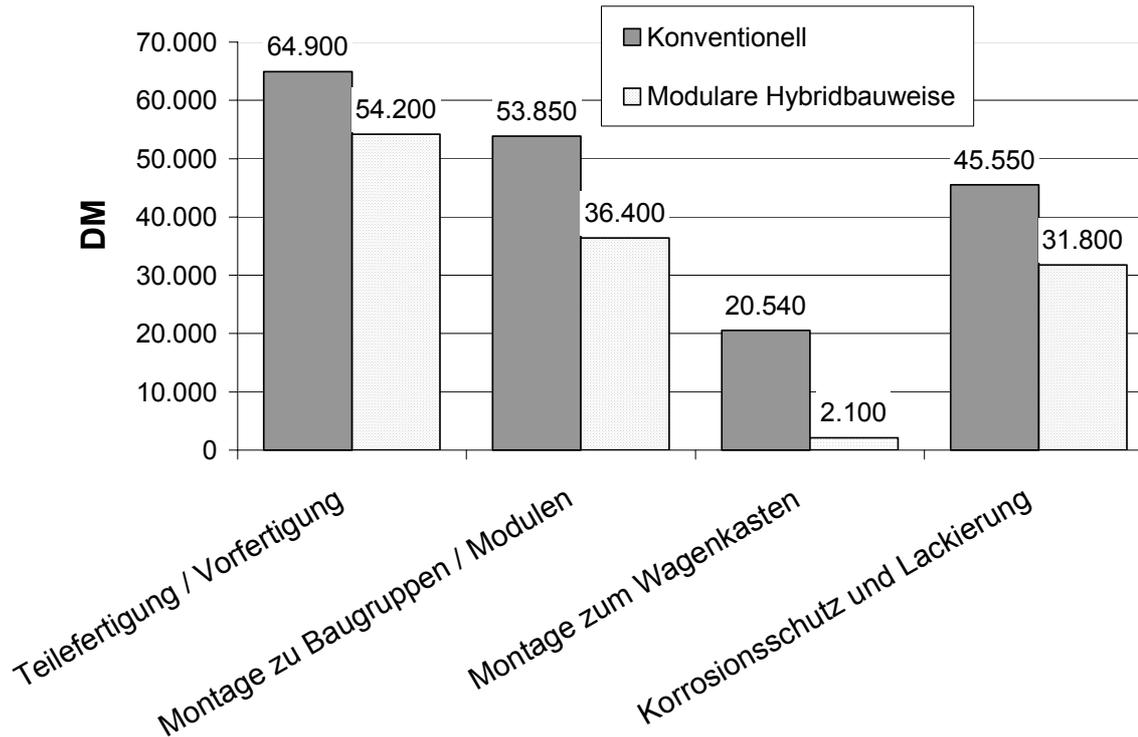
### 6.2.3.2 Kosten

Ein erster Kostenvergleich der konventionellen Wagenkastenbauweise mit der Modularen Hybridbauweise erfolgte auf Basis des erstellten Prototyps wobei eine Verstärkung und Optimierung der Prozesse im Sinne einer seriennahen Fertigung angenommen wurde. Eine abschließende Kostenbewertung ist zur Zeit noch nicht möglich, da die Umsetzung des Konzeptes über die Prototyperstellung noch nicht hinausgegangen ist.

Wesentlichen Einfluss auf die Kosten und die Wirtschaftlichkeit des Konzeptes der Modularen Hybridbauweise hat die Durchlaufzeit und die damit gekoppelte Kapitalbindung sowie in Verbindung hierzu die Standardisierung und Parallelisierung der Entwicklungs-, Produktionsvorbereitungs- und Fertigungsprozesse. Es ist davon auszugehen, dass bei einer konsequenten Weiterführung des PC-Konzeptes und einer entsprechenden Fertigungssteuerung bestimmte Basismodule oder Variationsmodule an Zulieferfirmen vergeben werden, die diese Module zum Zeitpunkt der Wagenkastenkonfiguration ggf. just-in-time anliefern. Dies führt zu einer sinkenden Kapitalbindung beim Finalhersteller. Erste Abschätzungen der Auswirkungen auf Kosten in der Produktionsvorbereitung und in der Fertigung zeigt [Bild 79](#) und [Bild 80](#).



**Bild 79** Vergleich der Kosten in der Produktionsvorbereitung pro Auftrag für ein Regionalschienefahrzeug

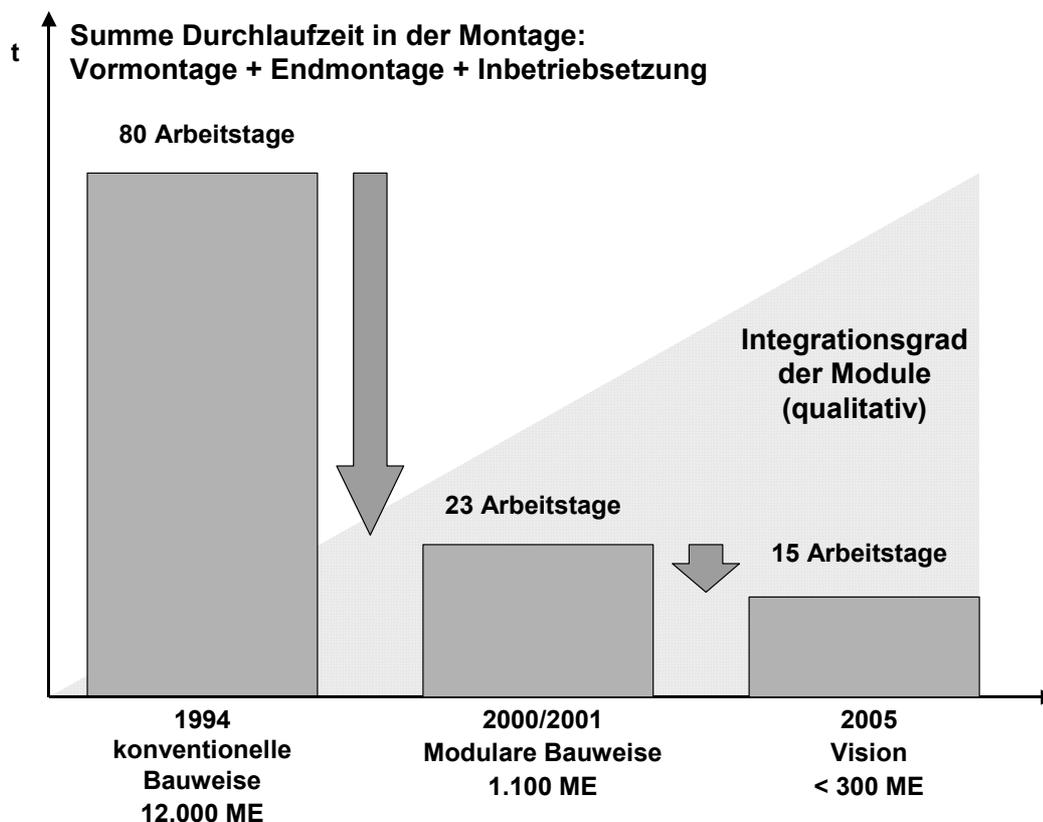


**Bild 80** Vergleich der Fertigungskosten pro Fahrzeug für ein Regionalschiene-fahrzeug

### 6.2.3.3 Ausblick

Die vorgestellte modulare Strukturierung des Wagenkastens im Rahmen der PC erlaubte neben der beschriebenen Verkürzung der Durchlaufzeiten eine vereinfachte Fremdvergabe der Modulfertigung und –komplettierung an Zulieferbetriebe im Sinne einer verteilten Wertschöpfung [EVE96a, IFF97, WAR99, WOL95] (Bild 81). Mittelfristiges Ziel des Konzeptes der beschriebenen Modularen Hybridbauweise ist die Übernahme der kompletten Entwicklungs-, Produktionsvorbereitungs- und Fertigungsarbeiten für die Basismodule durch den Zulieferer. Er wird dabei intensiv in den Entwicklungs-, den Produktgliederungs- und Produktionsprozess der Fahrzeuge eingebunden. Der Wertschöpfungsanteil der fremdbezogenen Basismodule sowie der Modulumfang und der Integrationsgrad nehmen dabei kontinuierlich zu. Zur Wahrung der Kernkompetenzen des Systemhauses übernimmt der Finalhersteller die Koordination des Projektablaufs, die Entwicklung und Produktion der Variationsmodule sowie die Montage der Module zum Wagenkasten einschließlich der Komplettierungsarbeiten. Die Bereitstellung der hochintegralen, kompletten Basismodule bei Auftragseingang durch den Zulieferer im Sinne einer Just-in-time-Fertigung erlaubt

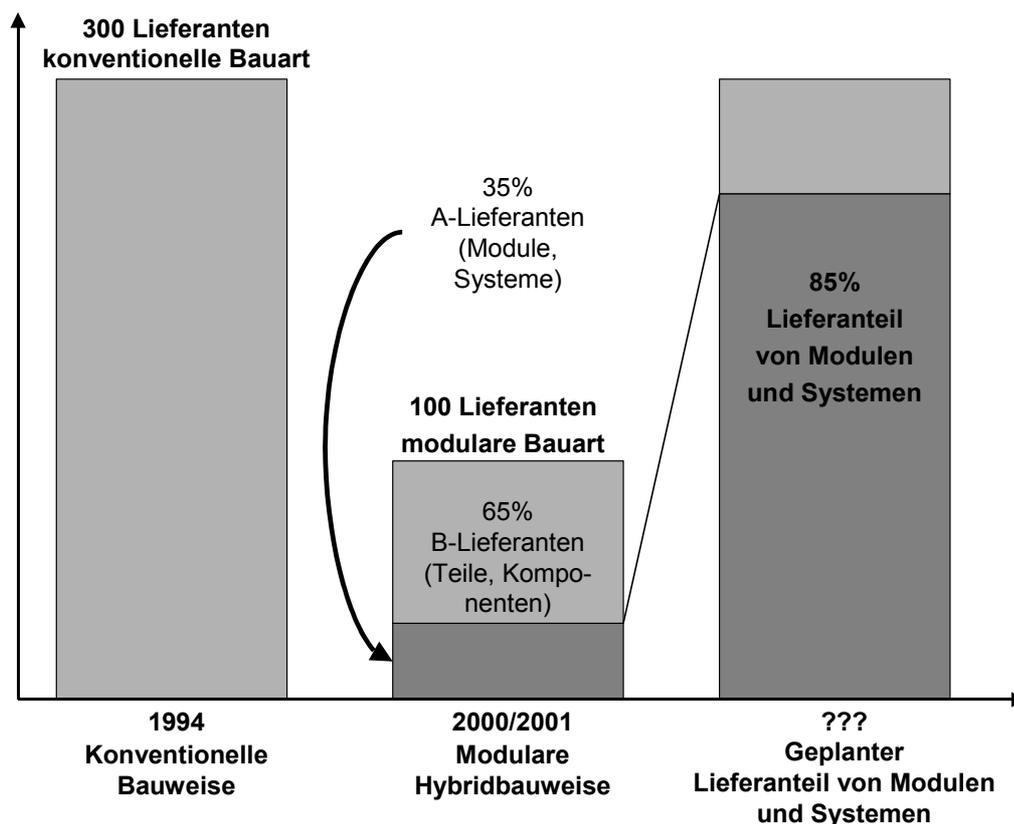
eine deutliche Reduzierung der Montageumfänge und damit eine Reduzierung der gesamten Montagezeit (Bild 81).



ME = Materialeinheiten

Bild 81 Verkürzung der Durchlaufzeit in der Montage durch Modulbildung und Fremdvergabe, in Anlehnung an [VÖL01]

Mittelfristiges Ziel im Schienenfahrzeugbau ist dabei eine drastische Reduzierung der Fertigungstiefe beim Finalhersteller sowie eine Erhöhung der Verantwortlichkeiten bei den Zulieferern. Dies vermindert weiterhin den Anteil der Zulieferbeziehungen des Finalherstellers zu Teil- und Komponentenherstellern (B-Lieferanten) und erhöht den Grad von sogenannten Systemlieferanten (A-Lieferanten). Angestrebt wird dabei im Rahmen von Modularisierungsbestrebungen die Erhöhung des Lieferanteils von Systemlieferanten auf über 90% [VÖL01] (Bild 82).



**Bild 82** Reduzierung der Lieferantenzahl im Schienenfahrzeugbau durch Modulkonzepte, in Anlehnung an [VÖL01]

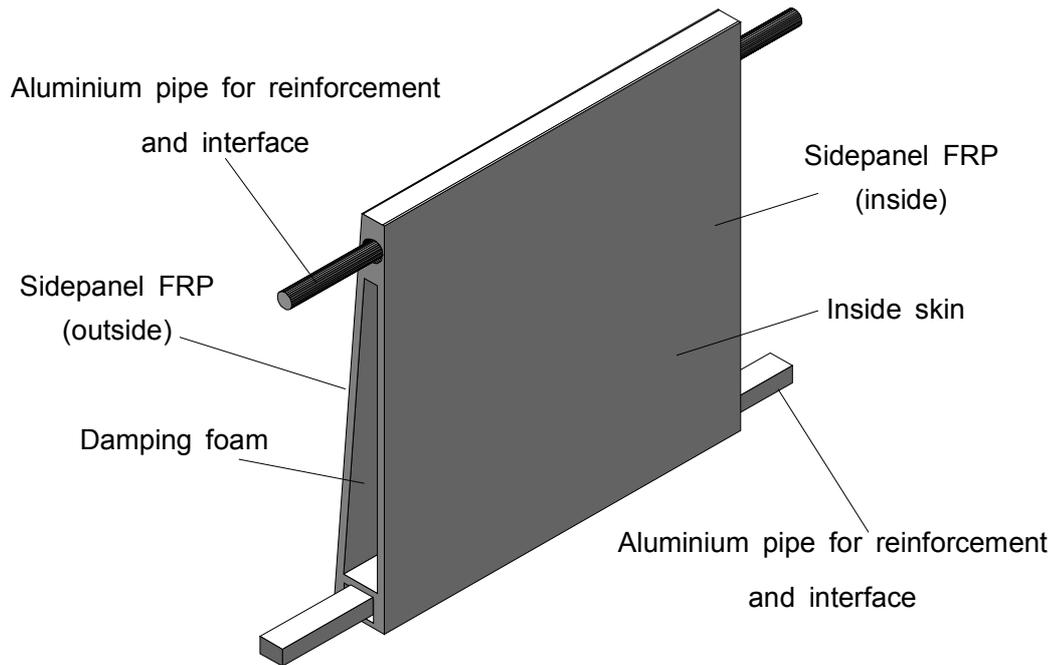
Zur konsequenten Weiterentwicklung und Nutzung eines modularen Wagenkastenkonzepts für Schienenfahrzeuge unter Nutzung des PC-Ansatzes wurde das Forschungsprojekt *ULIB* – ultralight integral body – initiiert. *ULIB* nutzt konsequent unter Berücksichtigung der modularen Strukturierung des Wagenkastens in Basis- und Variationsmodule die Vorteile des Einsatzes von verschiedenen Werkstoffen und hochintegralen Produktstrukturen im Wagenkasten. Hierdurch soll eine deutliche Massereduzierung sowie eine Minimierung der Teilstämme mit entsprechenden Montagevorteilen erzielt werden. Dem Einsatz von großflächigen FVK-Pultrusionsprofilen für die Basismodule des Wagenkastens kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu.

Durch die Aufteilung der Fahrzeugstruktur in nichtvariable Basis- und kundenspezifische Variationsmodule ergeben sich neue Möglichkeiten für den Einsatz von leistungsfähigen FVK-Werkstoffen in großflächigen Basismodulen. Da die kundenspezifische Anpassung der Fahrzeugstruktur über die in einer konventionellen und flexiblen Stahl-Differentialbauweise gefertigten Variationsmodule erfolgt, können

für die Basismodule starre Prozesse zum Einsatz kommen, die die Herstellung von hochintegralen, komplexen FVK-Strukturbauteilen ermöglichen. Das Pultrusionsverfahren zur Fertigung längsorientierter, endlosfaserverstärkter FVK-Profile stellt derzeit eines der wirtschaftlichsten kontinuierlichen Verfahren zur Herstellung von Strukturbauteilen aus faserverstärktem Kunststoff dar. Die Weiterentwicklung der Pultrusionstechnologie führte dazu, dass heute Großprofile mit Abmessungen von bis zu 4 m Breite, 0,5 m Profilhöhe bei Wandstärken zwischen 3-20 mm und Längen bis zu 12 m gefertigt werden können. Durch eine beanspruchungsgerechte Auswahl der verstärkenden Faserwerkstoffe, deren Ausrichtung und Volumengehalt sowie dem Einsatz leistungsfähiger Harzsysteme lassen sich somit hochbelastbare Strukturbauteile für Schienenfahrzeuge fertigen.

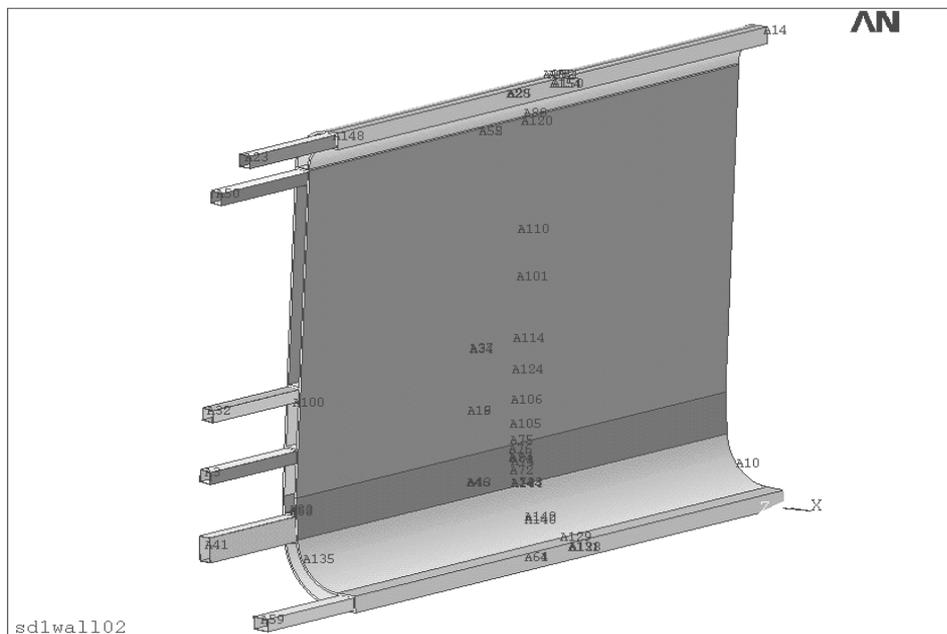
Im Rahmen des Forschungsvorhabens *ULIB* sollen als Basismodule großflächige, tragende Bauteile für einen Schienenfahrzeug-Wagenkasten, wie Seitenwände, Seitenwandsegmente, Dächer etc., aus pultrudierten faserverstärkten Kunststoffen, entwickelt werden. Aufgrund der im Vergleich zu Stahl und Aluminium schlechteren Druckfestigkeit dieser FVK-Profile und zur Vereinfachung der Montage sind diese durch entsprechende Metall-Profile aus Aluminium oder hochfestem Stahl, die während des Pultrusionsprozesses eingearbeitet werden, in Längsrichtung zu verstärken. Diese Verstärkungen bilden gleichzeitig die Schnittstelle. Ein weiterer Kerngedanke des Vorhabens ist die Zusammenführung der Funktionsträger für den Rohbau und Innenausbau. Eine Verkleidung der innenseitigen Oberfläche der pultrudierten Module mit zu montierenden und gewichtsbringenden Innenverkleidungselementen ist nicht erforderlich. Der hohe Dämpfungsgrad des Materials, das gute thermische Isolationsverhalten und die guten Oberflächenqualitäten von FVK ermöglicht den Verzicht auf zusätzliche verkleidende Komponenten. Denkbar wäre auch, zur Verbesserung des Komfortempfindens und der Innenraumakustik, die Anbringung einer leichten, textilen Verkleidung des Innenraums, die einfach auszuwechseln ist und somit eine schnelle optische Aufwertung des Innenraums ermöglicht. Zur Erhöhung der thermischen Isolation beim Einsatz in klimatisch extremen Regionen wäre eine innen- oder außenliegende, zusätzliche Isolationsschicht oder das Einbringen von Isolationsschäumen in die Profile während des Fertigungsprozesses möglich.

Bild 83 zeigt schematisch den Aufbau eines FVK-Seitenwand-Basismoduls mit integrierten Verstärkungsprofilen.



**Bild 83** Schematischer Aufbau eines pultrudierten Großprofils mit Aluminiumprofilverstärkungen

Zur ersten Abschätzung der mechanischen Bauteileigenschaften einer Seitenwand wurde ein FEM-Modell eines mit Aluminiumprofilen verstärkten Seitenwandmoduls aus pultrudiertem FVK mit dem FEM-Program ANSYS erstellt (**Bild 84**).



**Bild 84** FEM-Modell eines Seitenwandmoduls aus pultrudiertem FVK

Erste FEM-Berechnungen dieser Seitenwand mit einfacher, unidirektionaler Faserorientierung weisen ein gewichtsspezifisches, mechanisches Verhalten des FVK-Moduls nach, welches einem konventionellem Seitenwandelement aus Aluminium überlegen ist. Durch eine Anpassung und weitere Gewichtsoptimierung des FVK-Profils und der Möglichkeit des Verzichts auf eine separaten Innenverkleidung lassen sich somit neben erheblichen Einsparungen in der Montage deutliche gewichtsspezifische Vorteile im Wagenkasten erzielen.

## 7 Zusammenfassung

Die Attraktivität und Wettbewerbsfähigkeit des Personen-Schienenverkehrs wird in hohem Maße über die erreichbare Einsatzspezifikation der Fahrzeuge bestimmt. Anpassungen an infrastrukturelle Gegebenheiten, betriebliche Rahmenbedingungen und weitere kundenspezifische Anforderungen erfordern oft umfangreiche Überarbeitungen der Fahrzeugstruktur. Hieraus resultieren zahlreiche Produktvarianten, aus denen sich in Folge der geringen abzusetzenden Stückzahlen im Schienenfahrzeugmarkt kleine Losgrößen für die Hersteller ergeben. Die Privatisierung des Bahnverkehrs und die daraus entstandenen geänderten Marktbedingungen haben die geforderte Variantenvielfalt bei Schienenfahrzeugen, die über das Produkt hinausgehend zu kontinuierlichen Anpassungsprozessen in der Entwicklung, Produktionsplanung und Fertigung führt, zu einem bedeutenden Problem entstehen lassen.

Die steigende Variantenvielfalt in Produktionsunternehmen in Folge der Globalisierung der Märkte und des Wettbewerbs, hohe Kundenorientierung als Wettbewerbsfaktor und stetig kürzer werdender Innovationszyklen stellen insbesondere in der Verkehrsindustrie kein grundsätzlich neues Problem dar. Hersteller reagieren auf diese Herausforderung vielfach mit baukastenartigen, modularen Produktstrukturen, die eine mehr oder weniger kundenorientierte Konfiguration von Produktvarianten aus anbieterseitig definierten Standardbausteinen oder –modulen unter Nutzung von Skaleneffekten ermöglichen. Diese Form des Variantenmanagements wurde in den letzten Jahren insbesondere durch die Begriffe „Modulbauweise“ und „Plattformkonzept“ geprägt. Die Voraussetzung für den Erfolg dieser Konzepte liegt entweder in der Größe des Baukastens, der guten Antizipation und Umsetzung der Kundenwünsche oder in der Tatsache, dass der Markt keine anderen Varianten als die angebotenen nachfragt.

Das ganzheitlich zu betrachtende Transportsystem „Bahn“ verlangt jedoch aufgrund seiner Komplexität und der ausgeprägten funktionalen Wechselwirkungen zwischen Betrieb, Fahrweg und Fahrzeug nach einsatzspezifischen Fahrzeuglösungen, die in Ihrer Ausprägung weder vom Hersteller eindeutig vorhergesehen noch von ihm in der Anzahl begrenzt werden können. Als Folge daraus lässt sich keine anbieterseitig definierte Variantenvielfalt festlegen, die in wirtschaftlicher Weise den Marktforderungen nachkommen kann. Vielmehr wird die Umsetzung einer Unikatfertigung zur Serienfertigungsbedingungen gefordert. Die Analyse des Technikstandes zeigt, dass bisherige Bauweisen und Fertigungskonzepte entweder eine sehr flexible Produktgestaltung mit hohem Verrichtungsanteil oder eine wenig flexible, kapitalintensive aber hoch produktive Herstellung von Schienenfahrzeugen ermöglichen.

Der in dieser wissenschaftlichen Arbeit vorgestellte Lösungsansatz besteht in der Abkehr von konventionellen Bauweisen zu der Generierung eines Wagenkastenmischsystems, das die Gliederung des Wagenkastens in anbieterseitige, starre Basismodule und flexible, kundenspezifische Variationsmodule vorsieht. In Abhängigkeit von der gewünschten Variabilität und der daraus resultierenden Losgröße des Produktkonzeptes dominiert entweder der Anteil starrer, baukastenartiger Basisbausteine oder der Umfang kundenspezifisch anpassbarer Module. Entsprechend verteilt sich das Verhältnis von hochproduktiven zu hochflexiblen Bauformen und Fertigungskonzepten. Den Marktanforderungen nach hoher Variantenvielfalt bei kleiner Losgröße wird somit über die Werkzeuge Produktmodularisierung und Prozessflexibilität begegnet.

Die in dieser Arbeit entwickelte methodische Vorgehensweise unterstützt den Produktstrukturierungsprozess und die Technologieauswahl für das Wagenkastenmischsystem. Sie berücksichtigt dabei parallel die Parameter Produkttopologie, Variationsanforderungen sowie Bauformen und zugehörige Fertigungsprozesse.

In den ersten Schritten wird dabei der Wagenkasten in Submodule kleinen Umfangs unterteilt, die auf ihre funktionalen und topologischen Relationen hin analysiert werden. In weiteren Schritten erfolgt eine Analyse von geometrischen Variationsanforderungen und die Identifizierung von primär betroffenen Wagenkastenbereichen. Abschließend werden den Submodulen entsprechend ihrer erforderlichen geometrischen Flexibilität produktive oder flexible Bauweisen und Fertigungsverfahren zugeordnet. Aus der Ordnung und dem Vergleich der daraus entstandenen Matrizen lässt sich eine modulare Produktstruktur ableiten, die aus starren Basis- und flexiblen Variationsmodulen besteht.

Im Rahmen des Projektes „Modulare Hybridbauweise“ konnte in Zusammenarbeit mit einem Schienenfahrzeughersteller die Eignung der Methodik und die Erreichung von Vorteilen im Entwicklungs- und Produktionsprozess in ersten Ansätzen überprüft werden. Es wurde hierbei eine längsorientierte Modularisierung des Wagenkastens erarbeitet, die als Variationsmodule die Wagenkastenbereiche Voute, Dach, Untergestell und Fahrzeugboden vorsieht. Durch die modulare, variationsorientierte Produktstruktur wurden deutliche Vorteile in der Produktionsvorbereitung hinsichtlich Zeit und Kosten sowie in der Durchlaufzeitverkürzung um bis zu 30 % gegenüber konventionellen Bauweisen erzielt. Der reduzierte Anteil an produktspezifischen Betriebsmitteln führte dabei zu einer Verbesserung der Produktflexibilität bei sinkenden Fixkosten.

Aufgrund der vergleichbaren Zielsetzung des beschriebenen Konzeptes wird in Anlehnung an das Geschäftsmodell der *Mass Customization* die Übertragung des Zieles einer seriennahen Unikatfertigung auf den Wagenkastenbau in Folge der beschriebenen produktstruktur- und prozessorientierten Vorgehensweise als *Process Customization* bezeichnet.

Zusammenfassend wird das vorgestellte Konzept der *Process Customization* als geeignetes Werkzeug gesehen, den aktuellen und zukünftigen Herausforderungen im Wagenkastenbau von Schienenfahrzeugen im Sinne einer kundenindividuellen und damit einsatzspezifischen Serienfertigung zur Erhöhung der Attraktivität und Wahrung der Wettbewerbsfähigkeit des Transportsystems Bahn gerecht zu werden.

**8 Literaturverzeichnis**

- [ADT98] N. N.: Partnerschaft, Innovation und Internationalität. In: Firmenschrift der Adtranz Deutschland, 1998.
- [ALF99] Alfter, R.: Low-cost und Life-cycle-cost-Minimierung beim Regiosprinter. In: EI – Der Eisenbahningenieur 50 (1999) 11, S. 60-65
- [ALF00] Alfter, R.: Erfahrungen des Betreibers mit dem Low-Cost-Fahrzeug RegioSprinter – Vergleich zwischen Schienenfahrzeugen und Bussen. In: ZEV + DET Glasers Annalen 124 (2000) 2/3, S. 128-134
- [ALT78] Altenburg, K.: Systemlösungen für den Bau von Reisezugwagen. Dissertation Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden, 1978
- [ALT92] Altenburg, K.: Quo vadis Waggonbau? In: ZEV+DET Glas. Annalen 116 (1992) 10, S. 416-420
- [ALT97] Altenburg, K.; Sauer, O.: Stahl im Schienenfahrzeugbau. In: Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Tätigkeitsbericht 1994-1996, Düsseldorf
- [ALT99] Altenburg, K.: Quo vadis Waggonbau? – Einige aktuelle Konzepte und Richtungen der Bauweisenentwicklung im Waggonbau. In: ZEV+DET – Glasers Annalen 123 (1999) 11, S. 1-7
- [AND95] Anderegg, K.: Neue Faserverbund-Bauweisen für Tram- und Reisezugwagen; In: ZEV+DET – Glasers Annalen 119 (1995) 9/10, S. 484-492
- [AND96] Anderegg, K.: Composites – Strukturwerkstoffe der Zukunft. Fortschritte in der Anwendung von Faserverbundwerkstoffen. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 45 (1996) 7/8, S. 433-438

- [AND98] Anderson, D. M.: Agile Product Development for Mass Customization. McGraw-Hill, New York, Chicago, San Francisco, 1998
- [ATZ00] Atzorn, H.: Unterschiede der Bahn- und Automobilindustrie – ein Zulieferer beliefert beide. Tagungsband zur Rail#tec 2000, Dortmund
- [BAH01] N. N.: Internetseite der DB AG zur Bahnreform: [http://www.bahn.de/konzern/holding/wir/dbag\\_reform\\_030\\_inhalte.shtml](http://www.bahn.de/konzern/holding/wir/dbag_reform_030_inhalte.shtml), 2001
- [BAL97] Balzer, R.: CAD-Einsatz im restrukturierten Entwicklungsprozess. VDI-Berichte 1338, 1997
- [BAL98] Baldwin, C. Y.;  
Clark, K. B.: Modularisierung: Ein Konzept wird universell. In: Harvard Business Manager, 20 (1998) 2, S. 39-48
- [BAR95] Bartuschat, M.: Beitrag zur Beherrschung der Variantenvielfalt in der Serienfertigung. Dissertation TU Braunschweig, Schriftenreihe des IWF, 1995
- [BLA98] Blackenfelt, M.;  
Stake, R. B.: Modularity in the Context of Product structuring – a survey, NordDesign-Seminar, Proceedings, Royal Institute of Technology, KTH Stockholm, 26.-28. August 1998
- [BLE98] Blennemann, F.;  
Girnau, G.;  
Müller-Hellmann, A.: Regionaler Schienen-Personenverkehr. Neue Fahrzeuge und deren Einsatzfelder. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (Hrsg.), Alba Fachverlag, Düsseldorf, 1998
- [BEZ99] N. N.: Krisenstimmung bei Deutschlands Bahntechnik-Unternehmen. In: Berliner Zeitung 2.11.1999, S. 29
- [BON97] Bonz, M.: Lebens-Zyklus-Kosten als Entscheidungskriterium für die Beschaffung von Fahrzeugen. VDI-Berichte 1344, 1997

- [BOU97] Boutellier, R.;  
Dinger, H.;  
Lee, H.:  
Plattformen – ein Erfolgsfaktor im Wettbe-  
werbsdruck. In: Technische Rundschau  
(1997) 37, S. 58-61
- [BOY91] Boynton, A.;  
Victor, B.:  
Beyond Flexibility: building and managing the  
dynamically stable organization. In: California  
Management Review, 33 (1991) 3, S. 53-66
- [BOY93] Boynton, A.;  
Victor, B.;  
Pine, B. J.:  
New competitive strategies: Challenges to  
organizations and information technology. In:  
IBM Systems Journal, 32 (1993) 1, S. 40-64
- [BRE97] Breitling, U.;  
Uttenthaler, J.:  
Neue Bauweisen bei MAN-Niederflurbussen.  
VDI-Berichte 1341, 1996
- [CAB92] Cabos, P.:  
Werkstoffe für Schienenfahrzeuge, Stand  
und Entwicklungstendenzen. In: ETR – Ei-  
senbahntechnische Rundschau 41 (1992)  
11, S. 745-752
- [COE95] Coenenberg, A. G.;  
Prillmann, M.:  
Erfolgswirkungen der Variantenvielfalt und  
Variantenmanagement – Empirische Er-  
kenntnisse aus der Elektronikindustrie. In:  
Zeitschrift für Betriebswirtschaft H. 11 (1995)  
65. Jg., S. 1231-1253
- [DIL00] Dillig, G.;  
Schnaas, J.:  
Aluminium – ein etablierter Werkstoff im  
Schienenfahrzeugbau. In: Der Stadtverkehr  
45 (2000) 5, S. 30-35
- [DIN199] N. N.:  
DIN 199, Teil 2: Begriffe im Zeichnungs- und  
Stücklistenwesen; Stücklisten. Berlin, Köln  
1977
- [DIN EN  
12663] N. N.:  
DIN EN 12663, Festigkeitsanforderungen an  
Wagenkästen von Schienenfahrzeugen.  
Berlin 2000

- [DOE95] Doege, E.;  
Mathieu, H.;  
Schroeder, M.:  
Abschlusskolloquium zum DFG-  
Schwerpunktprogramm Flexible Umform-  
technik. Verlag Mainz, Aachen, 1995, S.  
8.1.1–8.1.14
- [DUE97] N. N.:  
Patentschrift der Duewag AG, Krefeld. Offen-  
legungsschrift DE 196 19212 A1, 1997
- [ECK98] Eckrodt, R.:  
Veränderungen im Schienenfahrzeugmarkt.  
Tagungsband zur RAILTEC 1998, Dortmund
- [ECK00] Eckrodt, R.:  
Fragen an Adtranz-Chef Rolf Eckrodt. In:  
Eisenbahn-Revue International (2000) 1, S.  
13-17
- [ERI98] N. N.:  
Impressionen von INNOTRANS und  
EURAILSPEED in Berlin. In: Eisenbahn-  
Revue International (1998) 12, S.518-523
- [EHR95] Ehrlenspiel, K.:  
Integrierte Produktentwicklung. Carl Hanser  
Verlag, München, Wien, 1995
- [ERX98] Erixon, G. :  
Modular Function Deployment – A Method  
for Product Modularisation. Doctoral thesis of  
KTH Stockholm, 1998
- [EVE89] Eversheim, W.;  
Schuh G.;  
Caesar Chr.:  
Beherrschung der Variantenvielfalt. In: VDI-  
Nachrichten, 131 (1989) Nr. 1, S. 42-46
- [EVE96] Eversheim, W.;  
Schernikau, J.;  
Goeman, D.:  
Module und Systeme: Die Kunst liegt in der  
Strukturierung. In: VDI-Nachrichten, 138  
(1996) 11/12, S. 44-48.
- [EVE96a] Eversheim, W.,  
Heyn, M.,  
Linnhoff, M.:  
Kooperative Systemführerschaft. In: VDI-  
Nachrichten, 138 (1996) ½, S. 24-27.
- [EVE96b] Eversheim, W.;  
Schuh G.:  
Betriebshütte – Produktion und Manage-  
ment, Teil 2. 7. Auflage, Springer Verlag,  
Berlin, 1996

- [EVE98] Eversheim, W.;  
Schenke, F.-B.;  
Warnke, L. Komplexität im Unternehmen verringern und beherrschen – Optimale Gestaltung von Produkten und Produktionssystemen. In: Adam, D. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement, Schriften zur Unternehmensführung Band 61, Wiesbaden, 1998
- [EWE99] Ewers, H.-J.;  
Ilgmann, G.: Wettbewerb im ÖPNV: Gefordert, gefürchtet und verteufelt. Wirtschaftswissenschaftliche Dokumentation, Diskussionspapier der TU Berlin, 1999
- [FEL97] Feldhusen J.: COMBINO – Kundennutzen durch Design-To-Cost. In: ZEV+DET – Glasers Annalen 123 (1999) 1, S. 181-186
- [FEL97a] Feldhusen J.;  
Lashin, G.: Gesichtspunkte zum Einsatz von 3D-CAD am Beispiel der Schienenfahrzeuge. VDI-Berichte 1357, 1997
- [FEL99] Feldhusen J.: Konstruktion bei Schienenfahrzeugen – das Allheilmittel? In: Tram News (1999) 8, S. 13
- [FLE95] Fleck, A.: Hybride Wettbewerbsstrategien. Dissertation, Wiesbaden, 1995
- [FOR99] Ford R.: Builders rise to standard trains challenge In: Railway Gazette International (1999) 8, S. 505-508
- [FRE99] Frederich F.: Vom Drehgestell zum Integral. In: ZEV+DET – Glasers Annalen 123, (1999) 1, S. 25-30
- [GAB94] Gabathuler, W.;  
Welte, H.;  
Schaad, F.: PA90 – ein Baukastensystem für Meterspur-Reisezugwagen. In: ZEV+DET – Glasers Annalen 118, (1994) 5, S. 264-274
- [GAU96] Gausemeier, J.;  
Fink A.;  
Schlake O.: Szenario-Management: Planen und Führen mit Szenarien, 2. Auflage. Carl Hanser-Verlag, München, Wien 1996

- [GIE94] Giesen, U.: Standardisierung als Möglichkeit einer kostengünstigen Stadtbahn. In: Der Nahverkehr (1994) 11, S. 44-46
- [GEI95] Geiger, M.; Engel, U.; Vollertsen, F.; Arnet, H.: Flexibles Profilbiegen mit Polyurethanmatrize. Abschlusskolloquium zum DFG-Schwerpunktprogramm Flexible Umformtechnik, Verlag Mainz, Aachen, 1995, S. 5.1.1-5.1.19
- [GEM98] Gembrys, S.-N.: Ein Modell zur Reduzierung der Variantenvielfalt in Produktionsunternehmen. Dissertation TU Berlin, Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum, 1998
- [GÖP98] Göpfert, J.: Modulare Produktentwicklung – Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1998
- [GRA99] O`Grady, P.: The Age of Modularity. Adams and Steele Publishers, New York, 1999
- [GRÄ00] Gräßler, I.: Mass Customization – das neue Paradigma der Automobilindustrie zur Jahrtausendwende? Shaker Verlag, Aachen, 2000
- [GUI99] Mc Guinness J.: Modulare Fahrzeugplattformen – die Patentlösung? In: Tram News (1999) 10, S. 13
- [HAC97] Hackenberg, U. Entwicklung- und Produktionssynergien in der Baukastentechnik. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 99 (1997) Sonderausgabe
- [HAM92] Hamsten, B.: Die neue Reisebus-Generation von Kässbohrer. In: ATZ 94 (1992) 4, S. 170-180
- [HAM97] Hamsten, B.; Stangl, G.: Aus Modulen kombiniert – die Baureihe Setra-Kombibus In: ATZ –Automobiltechnische Zeitschrift 99 (1997), 7/8, S. 404-413

- [HER92] Hermans, J.;  
Elsner, O.: Auf dem Weg vom Werkstoff zur Schienen-  
fahrzeugkonstruktion. In: Aluminium-  
Schienenfahrzeuge. Aluminium-Zentrale e.V.  
(Hrsg.). Hestra-Verlag, Darmstadt, 1992
- [HEI95] Heinrich, J. Rasanter Preisverfall erzwingt Rationalisie-  
rung. In: VDI-Nachrichten, Berlin, 17.2.95, S.  
12
- [HON99] Hondius H.: Die Entwicklung der Niederflur- und Mittel-  
flur- Straßen- und Stadtbahnen. In: Der  
Stadtverkehr (1999) 11/12, S. 6-24
- [IFF97] Iffland, K.: Mehr Systeme und Module. In: Automobil-  
Produktion, 11 (1997) 6, S. 24-26.
- [INN00] N. N.: Forschungsdialog DB 2000. Tagungsband  
zum Workshop anlässlich der INNOTRANS  
2000, Berlin
- [JOB98] Jobst, D.: Anforderungen der Politik an die Eisenbah-  
nen. In: EI – Der Eisenbahningenieur 49  
(1998) 1, S. 19
- [KAM95] Kamiske G. F.;  
Brauer, J.-P.: Qualitätsmanagement von A-Z. Carl Hanser  
Verlag, München, Wien, 1995
- [KAR00] Karch, St.,;  
Hödl, H.: Plattformgestützte Produktentwicklung für  
Schienenfahrzeuge. In: ZEV+DET – Glasers  
Annalen 124 (2000) 2/3, S. 74-82
- [KAW92] Kawazoe, K.: U-Bahn-Wagen aus Aluminium-Großprofilen  
für Singapur und Tokio. In: Aluminium-  
Schienenfahrzeuge. Aluminium-Zentrale e.V.  
(Hrsg.). Hestra-Verlag, Darmstadt, 1992
- [KET84] Kettner, H.;  
Schmidt, J.;  
Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung.  
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1984

- [KLE99] Kleinschmidt, H: Modernisierung von Fahrzeugen des Schienenpersonenverkehrs. In: ZEV+DET – Glasers Annalen 123 (1999) 1, S. 17-21
- [KÖR00] Körber, J.: Worauf beruht die Stärke der Bahnindustrie in Deutschland? In: EI – Der Eisenbahningenieur 51 (2000) 1, S. 40-42
- [KÖR00a] Körber, J.: Vom Konzept bis zum fahrplanmäßigen Einsatz eines Schienenfahrzeuges. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 49 (2000) 7/8, S. 456-464
- [KOH97] Kohlhase, N.: Strukturieren und Beurteilen von Baukastensystemen. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 1 Nr. 275. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- [KRA00] Krause, F.-L.;  
Tang, T.;  
Ahle, U.: Innovationsforum Virtuelle Produktentstehung. Tagungsband. Berlin, 2000
- [KRU99] Krummheuer, E.: Into the new millennium on new tracks. THE MAGAZINE, Firmenschrift der Adtranz, (1999) 3, S.10-16
- [KUH99] Kuhn, L.;  
Rother, F. W.: Heißer Tanz – Das Bestreben, jedem Käufer sein Wunschauto zu liefern, verstärkt den Zwang zur Rationalisierung. In: Auto Saapiens, Wirtschaftswoche 36 (1999) 9, S. 134-139
- [LAC98] Lackes, R.;  
Schnödt, G.: Konfigurationsmanagement. In: FB/IE, 47 (1998) 1, S. 28-35
- [LIP98] Lippoldt, M.: Anforderungen der Wirtschaft (als Kunde) an die Eisenbahn. In: EI – Der Eisenbahningenieur 49 (1998) 1, S. 20
- [LUD98] Ludewig, J.: Bahnreform 2. Stufe – Chancen und Herausforderungen. In: EI – Der Eisenbahningenieur 49 (1998) 1, S. 6-8

- [LUT99] Lutz, W. ;  
Haiger, M. : Aluminiumschweißen für den schnellen ICE  
3. In: Der Praktiker (1999) 4, S. 138-142
- [MAR89] March, A.: The future of the U.S. Aircraft Industry. Work-  
ing paper of the MIT Commission on Indus-  
trial Productivity, 1989
- [MEN97] Menz, W.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. VCH  
Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1997
- [MER95] Mertins, K. ;  
Sauer, O. : Was kann die Produktionstechnik für die  
Verkehrstechnik leisten? In: Spur, G. (Hrsg.):  
Leistungspotenziale zur Marktführerschaft.  
Tagungsband zum Produktionstechnischen  
Kolloquium PTK 95. Berlin, 1995, S. 155-169
- [MEY99] Meyer, W.;  
Orschall, B.;  
Krause, W.: Kölner Konzept für einen neuen Hochflur-  
Stadtbahnwagen. In: Der Nahverkehr (1999)  
6, S. 15–20.
- [MER94] Mertins, K.;  
Sauer, O.;  
Rabe, M.: Schienenfahrzeugfertigung der Zukunft. In:  
EI – Der Eisenbahningenieur 45 (1994) 1,  
S. 28-32
- [MIL93] Miller, A.;  
Dess, G. G.: Assessing Porter's model in terms of its  
generalizability, accuracy and simplicity. In:  
Journal of Management Studies, 30 (1993) 4,  
S. 553-585
- [MOL88] Molin, P.: The Swedish Stainless Steel High Speed  
Train. In: 1. Global Market Development for  
stainless Steel, 1988, S. 77
- [MÖL00] Möller, D. G.;  
Noack, M.;  
Wehrberger R.: Die modulare Regionalfahrzeugfamilie Desi-  
ro. In: ETR – Eisenbahntechnische Rund-  
schau 49, (2000), 1/2, S. 44-50
- [MÜL96] Müller, H.;  
Sauer, O.: Schienenfahrzeugfertigung im Umbruch. In:  
EI – Der Eisenbahningenieur 47 (1996) 2, S.  
5-9

- [OLL98] Ollier, B.: Untersuchung zur flexiblen Blechumformung mit Laserstrahlung. Dissertation RWTH Aachen, Shaker-Verlag, Aachen, 1998
- [PAH97] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre. 4. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997
- [PAU00] Paula, M. : Web-basierter Produktkonfigurator für modulare Metrofahrzeuge. Tagungsband zum 4. internationalen Heinz Nixdorf Symposium: Auf dem Weg zu den Produkten von morgen. Paderborn, 2000
- [PES94] Pester, W.: Renaissance der Bahn beschert Branche stetes Wachstum. In: VDI-Nachrichten 24 (1994) 6, S. 1
- [PIL98] Piller, F.-T. Kundenindividuelle Massenproduktion. Carl Hanser Verlag, München, Wien 1998
- [PIN84] Pine, B. J.: Maßgeschneiderte Massenfertigung: Neue Dimensionen im Wettbewerb. Wirtschaftsverlag Carl Ueberreuter, Wien, 1984
- [PIN91] Pine, B. J.: Paradigma shift: From mass production to mass customization. Master thesis, MIT Cambridge, 1991
- [PIN93] Pine, B. J.; Pietrocini, T. W.: Standard modules allow mass customization work. In: Harvard Business Review 71 (1993) 5, S. 108-119
- [PIN93a] Pine, B. J.: Mass Customization products and services. In: Planning Review 21 (1993) 4, S. 6-13, u. 55
- [POR79] Porter, M. E.: On Competition. Harvard Business Review Book Series, Boston, 1979
- [POR92] Porter, M. E.: Wettbewerbsvorteile. Campus Verlag, Frankfurt/New York, 1992

- [POR95] Porter, M. E.: Wettbewerbsstrategie. Campus Verlag, Frankfurt/New York, 1995
- [QUE95] Quelch, J. A.;  
Kenny, D.: Lieber den Gewinn steigern als die Zahl der Varianten. In: Harvard Business Manager, (1995) 1, S. 94–102
- [RAT93] Rathnow, P. J.: Integriertes Variantenmanagement. Dissertation, Göttingen, 1993
- [ROB98] Robertson, D.;  
Ulrich, K.: Planning for Product Platforms. In: Sloan Management Review, 39 (1998) 4, S. 19-31
- [RÖS88] Rösch, D.: Kunststoffanwendung im Omnibusbau. In: ZEV+DET – Glasers Annalen 112 (1988) 10, S. 359-364
- [RUD92] Rudolph, G.: Beitrag zur Entwicklung eines anforderungsgerechten rechnergestützten Montageprozeßsteuerungssystems im Schienenfahrzeugbau unter besonderer Berücksichtigung optimierender Steuerungsstrategien. Dissertation, TU Dresden, 1992
- [SAW98] Sawhney, M. S.: Leveraged High-Variety Strategies: From Portfolio Thinking to Platform Thinking. In: Journal of the Academy of Marketing Science, 26 (1998) 1, S. 54-61
- [SAX99] Saxe A. F. : Of modules and maintenance. In: Railway Gazette International, 8/99, S. 532-533
- [SCH94] Schmidt B.-L.;  
Bauer G.: 50 Jahre Einheitsstraßenbahn. Der Weg bis zum KSW. EK-Verlag, Freiburg, 1994
- [SCH00] Schmidt, H.;  
Zimmer, H.;  
Kondziella, R.: Entwurfswerkzeug zur Erstellung kundenspezifischer Fahrzeugmodelle. In: EI – Der Eisenbahningenieur 51 (2000) 9, S. 40-44

- [SCH01] Schmidt, H.;  
Zimmer, H.;  
Seliger, G.;  
Kross, U.:  
Concepts for Product Platforms – Applying a Successful Concept from Elsewhere to the Construction of Rail Vehicles. In: RTR (2001) 2/3, S. 4-11
- [SCI00] N. N.:  
Instandhaltung von Schienenfahrzeugen. Marktstudie der SCI Verkehr GmbH im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, 2000
- [SEL97] Seliger G.;  
Friedrich U.;  
Müller K.;  
Perlewitz H.:  
Produktmodularität steigert die Nutzenproduktivität von Ressourcen. In: ZWF 92 (1997) 11, S. 592-595
- [SEL00] Seliger, G.;  
Hecht, M.;  
Schmidt, H.:  
Plattform- und Modularisierungskonzepte im Schienenfahrzeugbau. Forschungsstudie des Fachgebiets Montagetechnik und Fabrikbetrieb, TU Berlin, 2000
- [SHU94] Schuh, G.;  
Herf, H.-D.:  
VMEA, Variantenmanagement in Entwicklung, Planung und Änderungsdienst. In: ZWF 89 (1994) 11, S. 552-554
- [SPU94] Spur, G.;  
Stöferle, T.:  
Handbuch der Fertigungstechnik. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1994
- [SPU94a] Spur, G.:  
Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1994.
- [STI98] Stiefel, S.:  
Mit Modularer Hybridbauweise „Made in NRW“ zu kostengünstigen Kleinserien. Dokumentationsunterlagen zur Beitragsreihe „Wirtschaftlichkeit durch innovative Konzepte“ anlässlich der Fachkonferenz „Rail#tec98“ in Dortmund, 1998
- [SUH98] SUH, N. P.:  
Manufacturing System Design. In: Annals of the CIRP Vol. 47 (1998), S. 627-639

- [SUH99] SUH, N. P.: Axiomatic design: Advances and Applications. Oxford University Press, 1999
- [TRE00] Trebo, D.;  
Schmelzer, E.: Das modulare Fahrzeugkonzept DESIRO. VDI Berichte 1559: Berechnung und Konstruktion im Fahrzeugbau. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000
- [TSE96] Tseng, M. M.;  
Jiao, J.: Design for Mass Customization. In: Annals of the CIRP Vol. 45 (1996), S. 153-156
- [TSP00] N. N.: Kaum jemand steigt auf die Bahn um. In: Der Tagesspiegel (2000) 17181, S. 4
- [ULR91] Ulrich, K.;  
Tung, K.: Fundamentals of Product Modularity. In: Issues in Design Manufacture/Integration, DE-Vol. 39. ASME, MIT Cambridge, Massachusetts, 1991
- [ULR95] Ulrich, K.;  
Eppinger, S.: Product Design and Development. McGraw-Hill, New York, 1995
- [ULR95a] Ulrich, K.: The role of product architecture in the manufacturing firm. In: Research Policy (1995) 24, S. 419-440
- [UNI99] N. N.: Towards a Single European Railway System – Conventional Rail Interoperability. Informationspapier der UNION OF EUROPEAN RAILWAY INDUSTRIES, Brüssel, 1999
- [VER01] N. N.: Verkehrsbericht 2001 der Bundesregierung. In: EI – Der Eisenbahningenieur 52 (2001) 4, S. 100-102
- [VÖL01] Völkening, W.: Moderne Schienenfahrzeuge – Erfahrungen, Neuheiten. In: ZEV+DET – Glasers Annalen 125 (1988) 2, S. 78-80
- [VOL00] Volz, A.K.: Systemorientierter Karosserie-Konzeptentwurf am Beispiel der Crashsimulation. Dissertation TU Ilmenau, 2000

- [WAG99] Wagner, R.: Die Veränderungen am Eisenbahn-Markt aus der Sicht der Schienenfahrzeug-Industrie. In: EI – Der Eisenbahningenieur 50 (1999) 8, S. 31-36
- [WAR99] Waringer, D.; Piller, F. T.: Modularisierung in der Automobilindustrie – neue Formen und Prinzipien. Shaker Verlag, Aachen, 1999
- [WEI99] Weißgerber, F.: Notwendigkeit der Anpassung der Produktion an internationale Herausforderungen;. Tagungsband zum Dresdner Produktionstechnik Kolloquium, Dresden, 1999
- [WEI00] Weiger, U.: Grenzen des Bahnwettbewerbs. In: Eisenbahnrevue (2000) 3, S. 128-130
- [WES92] Westkämper, E.; Laucht, O.: Flexibles, zellenorientiertes Montagekonzept für den Schienenfahrzeugbau. In: wt - Wissenschaft und Technik (1992) 12, S. 46-49
- [WIT98] Witt, P.: In Deutschland wird jede Kleinigkeit aufgebaut. In: Der Tagesspiegel, 2.11.1998
- [WOL95] Wolters, H.: Modul- und Systembeschaffenheit in der Automobilindustrie – Gestaltung der Kooperation zwischen europäischen Hersteller- und Zulieferunternehmen. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 1995.
- [WßN99] Weißner, R. Vernetzte Produktentstehungsprozesse, Tagungsband zum Dresdner Produktionstechnik Kolloquium, Dresden, 10/99
- [ZIJ00] Zijdemanns, P.; Frunt, Lex.: Bessere Harmonisierung von Fahrzeugen mit Hilfe eines integrierten Systemansatzes. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 49 (2000) 7/8, S. 465-475