



Institut für Konstruktionstechnik
und Technisches Design
Universität Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. H. Binz

Fabian Rusitschka

**Methodik zur Auswahl von lösbaaren
Verbindungen in der variantenreichen
Serienfertigung**

Bericht Nr. 662

Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung

Von der Graduate School of Excellence
advanced Manufacturing Engineering der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von

Dipl.-Ing. Fabian Rusitschka
geboren in Ludwigsburg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Tag der mündlichen Prüfung: 02.02.2017

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
Universität Stuttgart

2017

DE 93

ISBN-10: 3-3-946924-00-X

ISBN-13: 978-3-946924-00-5

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon: +49 (0)711 685-66055

Telefax: +49 (0)711 685-66219

E-Mail: mail@iktd.uni-stuttgart.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand der Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME) der Universität Stuttgart am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) und bei der AUDI AG.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz, dem Institutsleiter des IKTD für die engagierte Betreuung der vorliegenden Arbeit. Die von ihm eingeräumten Freiräume und das große Vertrauen bei der Gestaltung der Arbeit ermöglichten die Umsetzung des Forschungsvorhabens. Herrn Prof. Dr.-Ing. Engelbert Westkämper danke ich für die Übernahme des Mitberichts und die enge Begleitung des Vorhabens.

Für den umfassenden Einblick in die aktuellen Entwicklungs- und Produktionsprozesse bei meinem Industriepartner bin ich außerordentlich dankbar. Das mir dort entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung haben maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Stellvertretend gilt mein Dank an dieser Stelle Dipl.-Ing. Alois Brandt, Dr.-Ing. Bernd Mlekusch und Dr.-Ing. Jens Bunte, aber auch den vielen Kollegen, welche die meinen beruflichen und persönlichen Lebensweg geprägt haben.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Hon.-Prof. Dipl.-Ing. Alfred Katzenbach für die wertvollen Hinweise und die spannenden Diskussionen, auch über das Thema hinaus. Meinen Kollegen am IKTD, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Daniel Roth möchte ich für die Unterstützung und lehrreiche Zeit danken.

Der Größte Dank gilt jedoch meinen Eltern, Gudrun und Franz Rusitschka, und meinem Bruder Simon Rusitschka, dass sie mir immer den Freiraum gegeben haben, meinen Weg zu gehen und diesen vorbehaltlos gefördert haben. Meiner Freundin Verena danke ich für das große Verständnis und die Geduld, welche den Abschluss der dieser Arbeit überhaupt ermöglicht hat.

Ingolstadt, Februar 2017

Fabian Rusitschka

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abstract.....	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.1.1 Relevanz der Verbindung in der variantenreichen Serienfertigung	1
1.1.2 Relevanz der Auswahl und Gestaltung der Verbindung	3
1.1.3 Relevanz der Unterstützung bei der Auswahl und Gestaltung der Verbindung.....	5
1.2 Problemstellung	6
1.3 Forschungslücke.....	10
1.4 Zielsetzung und Forschungsfragen.....	11
1.5 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Struktur	12
1.5.1 Einordnung der Arbeit	15
1.5.2 Aufbau und Gliederung	15
2 Ausgangssituation.....	17
2.1 Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung.....	17
2.1.1 Lösbare Verbindungen in der automobilen Montage.....	18
2.1.2 Trend bei eingesetzten Materialien und Verbindungen in der Automobilindustrie.....	27
2.2 Auswahl der Verbindungstechnik.....	31
2.2.1 Beteiligte Arbeitsbereiche bei der Auswahl von Verbindungen	31
2.2.2 Beziehung zwischen Entwicklung und Produktion	32
2.2.3 Prozess zur Auswahl von Schraubverbindungen	34
2.2.4 Bewertung der Auswahl der Verbindungstechnik.....	36

2.3 Unterstützung der Auswahl und Auslegung der Verbindung	36
2.3.1 Bestehende Werkzeuge zur Unterstützung der Auswahl von Verbindungen	36
2.3.2 Bewertung der bestehenden Werkzeuge zur Unterstützung der Auswahl und Auslegung von Montageverbindungen	37
3 Grundlagen und Stand der Technik	39
3.1 Produkt- und Prozessdokumentation	40
3.1.1 Modelle zur integrierten Produkt- und Prozessbeschreibung	41
3.1.2 Systemtheorie	49
3.1.3 Zusammenfassung Produkt- und Prozessdokumentation	52
3.2 Unterstützung der Prozessauswahl mit Fokus auf Verbindungsprozesse	54
3.2.1 Kriterienkatalog für die Analyse der Strategien zur Material- und Prozessauswahl	56
3.2.2 Prozessauswahl mittels freier Suche basierend auf quantitativer Analyse	59
3.2.3 Prozessauswahl mittels Fragenkatalog	64
3.2.4 Prozessauswahl mittels fallbasiertem Schließen	68
3.2.5 Zusammenfassung Unterstützung der Prozessauswahl	69
4 Konkretisierung der Aufgabenstellung und Ableiten von Anforderungen	71
4.1 Konkretisierung der Aufgabenstellung	71
4.2 Ableitung der Anforderungen an die Auswahl von lösbaren Verbindungen	72
5 Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen	77
5.1 Ablaufdiagramm des Assistenzsystems für die Auswahl von lösbaren Verbindungen	77
5.1.1 Planen der Verbindung, Klären der Anforderungen	79
5.1.2 Konzipieren und Bewerten möglicher Verbindungen	80
5.1.3 Entwerfen der Verbindung	85

5.1.4 Ausarbeiten der Verbindung.....	86
5.2 Integriertes Produkt- und Prozessmodell.....	87
5.3 Beschreibung des Lösungsraums durch die Ermittlung von Verbindungsszenarien.....	91
5.3.1 Ermittlung der Verbindungsszenarien.....	92
5.3.2 Berechnung der an den Verbindungspunkten zu übertragenden Kräfte.....	95
5.4 Ganzheitliche Bewertung von Montage-Verbindungen.....	97
5.4.1 Erfassung der Aufwendungen der lösbaren Verbindungen.....	98
6 Anwendung der Methodik.....	105
6.1 Architektur des Assistenzsystems.....	105
6.1.1 Marktplatz zur Erzeugung von Grobentwürfen.....	105
6.1.2 Schnittstellen zwischen den Modulen.....	106
6.1.3 Module zur Erzeugung von Grobentwürfen.....	108
6.2 Implementierung in das Arbeitsumfeld der Konstrukteure.....	111
7 Evaluation.....	119
7.1 Aufwendungen aus Schraubverbindungen ohne Assistenzsystem ...	120
7.2 Aufwendungen aus Schraubverbindungen mit Assistenzsystem.....	121
7.3 Verbesserung des Verwendungszusammenhangs.....	123
8 Zusammenfassung.....	125
9 Ausblick.....	127
Literaturverzeichnis.....	129

Abkürzungsverzeichnis

AP_n	Anforderungsprofil
AP_{allg}	allen Anforderungsprofilen gemeinsamen Anforderungen
AP_{VS_i}	aus dem Verbindungsszenario VS_i resultierenden Anforderungen
d_{min}	minimalen Abstand zwischen zwei Verbindungspunkten
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DFMA	Design for Manufacture and Assembly
F_{uee}	Fügeelement
F_{kte}	Funktionselement
GE	Geldeinheit
He_i	Hilfselement
KA_i	Aufwendungen aus Karosseriebau
KA_i^{FP}	Aufwendungen im Karosseriebau (Fügeprozesse)
$KA_i^{Winitial}$	Aufwendungen im Karosseriebau (Werkzeug (Invest))
$KA_i^{Wlaufend}$	Aufwendungen im Karosseriebau (Werkzeug (Betrieb))
$KA_i^{Einzelteil}$	Aufwendungen im Karosseriebau (Einzelteil)
LA_i	Aufwendungen aus Lackiererei
MP	Montageprozessgrößen
MA_i	Aufwendungen aus Montage
MP_i	Montageprozess
MP_i^{FP}	Fügen
MP_i^{HP}	Handhaben
MP_i^{AP}	Ausrichten
MP_i^{KP}	Kontrollieren
MP_i^{SP}	Sonderoperationen
MA_i^W	Aufwendungen für Werkzeuge und Betriebsmittel
$MA_i^{Winitial}$	Beschaffungskosten
$MA_i^{Wlaufend}$	Betriebskosten

$MA_i^{Einzelteil}$	Aufwendungen für Verbindungselemente
OEM	Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster)
PA_i	Aufwendungen aus dem Presswerk
$PA_i^{Winitial}$	Aufwendungen im Presswerk (Werkzeug (Invest))
$PA_i^{Wlaufend}$	Aufwendungen im Presswerk (Werkzeug (Betrieb))
PL_{th}	Prinziplösungen
Pp	Produktionsprozess
Pp_V	PP Verbindung
Pp_{Fuee}	PP Fügeelement
Pp_{Fkte}	PP Funktionselement
Pp_{He_i}	PP Hilfselement i
SFB 361	Sonderforschungsbereich 361
SVE	Standard Verbindungselemente
SMP	Standard Prozessgrößen
TP^s	Standard Teilprodukte
TP^o	optionale Teilprodukte
TP_m	Teilprodukte eines Produktionsprogramms M
VA_i	Gesamtaufwendungen einer Verbindung
VP_{thmax}	maximale Anzahl der Verbindungspunkte
VE	Verbindungselemente
VP_{max}	maximal zu berücksichtigenden Verbindungspunkte
$VP_{genutzt}$	Verbindungspunkte, die zur Kraftübertragung genutzt werden
$VP_{ungenutzt}$	Verbindungspunkte, die nicht zur Kraftübertragung genutzt werden
VT_m	Verbindungstechniken
VV	Verbindungsvarianten
VP_j	Verbindungspunkte
VS_i	Verbindungsszenarien
WZL	Werkzeugmaschinenlabors der RWTH Aachen

Abstract

With the methodology for the selection of solvable connections in the multi-variant series production an assistance system for the early design stage, focusing on the economic optimization, was developed.

Multi-variant series production is characterized by huge complexity due to the combination of variety and change. Decisions in the design stage heavily influence the production. For example, a single bolted connection averages expenditures of more than 500.000 thousand euros. This number shows the impact and importance of single decisions in the design process over lifetime. Therefore, the selection of the technical and economical best connection is crucial.

The main challenge in the selection of connections is to take into account the amount of different materials and connection techniques and the economic evaluation of those. For instance, there exist more than 10.000 different possibilities to join a standard Electronic Control Unit (ECU) to a chassis part. It is necessary to survey all the different possibilities in order to ensure the optimal selection. This is why methodological support and an assistance system are needed.

The main contribution is the description of the connection as a product and usage of product development methods for the design of connections. Following the standard product development process, requirements are derived in the beginning.

Computer-based and application-specific technically feasible solutions are determined and economically evaluated. In a marketplace different modules derive the possible connections and engineers will be offered an ordered overview of all of these solutions, from which they can transfer the most economical solution into the design. The complete documentation of product and process information in an integrated model completes the design of the connection.

From existing support systems in the selection and design of connections, the methodology differs on one side by the level of detail, on the other by the integrated economic evaluation of the solutions.

The level of detail exceeds the existing systems because the methodology does not select from a general list of all connections (top-down), but calculates application-specific the possible connections for each problem (bottom-up). In the top-down method, a solution must be applied to different connection problems, which requires a general description of the characteristics. On the other hand all characteristics of the parts to

be connected can be fully taken into account with the bottom-up approach. This allows not only to compare techniques with each other (screw or snap-on connection), but also to investigate alternatives within a connection technology (e. g. 3 screws M6 or 4 screws M5).

A further advantage of the methodology is the consideration of different information sources and types. The modular architecture includes in addition to case-based and rule-based modules, the ability to integrate knowledge in encapsulated form. This allows the inclusion of external sources of information. In addition, the modular structure can be expanded and new materials and connections can be included easily.

The methodology has been evaluated on the bolted connections of a multi-variant series production vehicle. It could be shown that the application of the methodology resulted in an economical improvement of 5.2 %.

Future work can address three aspects: the integration of additional detachable and non-detachable connection techniques, adding more targets in addition to the cost-effectiveness (e. g. lightweight construction), as well as the consideration of connection systems with more than one connection technology.

1 Einleitung

Mit der „Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung“ wird eine Vorgehensweise beschrieben, die die Auswahl der Verbindungstechnik in der Konzeptphase des Konstruktionsprozesses so unterstützen soll, dass letztlich ein signifikanter Beitrag zur Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses geleistet werden kann.

Die Beschreibung der Relevanz der Verbindung im Produktionsprozess und der Unterstützung des Auswahlprozesses (vgl. Kapitel 1.1) führt zur Konkretisierung der Problemstellung (vgl. Kapitel 1.2). Die Identifizierung der für diese Problemlage bestehenden Forschungslücke (vgl. Kapitel 1.3) ermöglicht die Formulierung der Forschungsfragen (vgl. Kapitel 1.4). Eine wissenschaftstheoretische Einordnung liefert die Struktur für den Aufbau der Arbeit (vgl. Kapitel 1.5).

1.1 Motivation

Verbindungen zwischen zwei oder mehreren Bauteilen haben sowohl Auswirkungen auf das Produkt als auch auf den Produktionsprozess [LEBACQ02, S. 405]. Diese werden größtenteils bereits in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses mit der Auswahl der Verbindungstechnik durch den Konstrukteur festgelegt. Die vielfältigen Herausforderungen bei dieser Auswahl verdeutlichen die Notwendigkeit der methodischen Unterstützung des Konstruktionsprozesses [EHRENSPIEL92, S. 180].

1.1.1 Relevanz der Verbindung in der variantenreichen Serienfertigung

Lösbare Verbindungen (im Folgenden kurz „Verbindungen“ genannt) spielen bei Produkten, die aus mehr als einem Bauteil bestehen, eine entscheidende Rolle [LEBACQ02, S. 405].

Auswirkungen der Verbindung auf die Produkteigenschaften

Die Eigenschaften von Produkten, welche aus mehreren Bauteilen bestehen, werden stark von den Verbindungen zwischen diesen bestimmt. Ist dies bereits heute der Fall, so werden die Trends der Individualisierung und des Leichtbaus diese Entwicklungen weiter verstärken. Dabei ist eine gegenseitige Beeinflussung zu beobachten: Zum einen ermöglicht die Weiter- und Neuentwicklung in der Verbindungstechnik sowohl neue Konzepte für den Leichtbau als auch die Möglichkeit der weiteren

Berücksichtigung von kundenindividuellen Wünschen. Zum anderen gehen aus den genannten Trends neue Herausforderungen an die Verbindungstechnik hervor, welche durch Weiter- und Neuentwicklungen erfüllt werden müssen.

Leichtbau mit dem Fokus auf der Reduzierung des Ressourcenverbrauchs und der Verbesserung der Produkteigenschaften ist eines der wichtigsten Ziele bei der Entwicklung von zukünftigen Produkten. Neben Ansätzen bei der Produktgestalt wie Integralbauweise und bionische Strukturen bieten der Einsatz innovativer Materialien wie Faserverbundwerkstoffe, hoch- und höchstfester Stähle sowie spezielle Legierungen ein großes Potenzial [WIEDEMANN07, S. 2].

Die Verbindung dieser Materialien erfordert die Weiter- und Neuentwicklung der Verbindungstechnik, da bestehende Techniken nicht oder nur begrenzt auf die neuen Materialien übertragbar sind. Darüber hinaus bestehen heutige Produkte oftmals nicht nur aus einem Material, sondern sind immer häufiger durch einen Materialmix gekennzeichnet [HAGE09, S. 45]. Dies steigert die Anforderungen an die Verbindungstechnik und damit die Herausforderung der Auswahl zusätzlich. Die Beherrschung der durch neue Materialien und Individualisierung hervorgerufenen Variantenvielfalt stellt dabei einen wesentlichen Wettbewerbsfaktor dar [ZENNER06, S. 1 f.].

Neben dem Leichtbau hat generell die Individualisierung einen großen Einfluss auf die Produkte. Der sich seit den 1990er-Jahren vollziehende Wandel von Verkäufer- zu Käufermärkten, gepaart mit einer globalen Kaufkraftverschiebung, zwingt die Unternehmen der Konsumgüterbranche dazu, ihr Produktportfolio ständig anzupassen und zu erweitern. Besonders ausgeprägt ist dieser Trend im Bereich der Automobilindustrie, in der zum einen die Anzahl der unterschiedlichen Modelle, zum anderen aber auch die Vielfalt der dem Kunden angebotenen Individualisierungsoptionen die Varianz ganz erheblich erhöhen. Beispielsweise bestehen 10^{17} theoretisch mögliche unterschiedliche Varianten des 7er BMW [ALICKE05, S. 135]. Forscher beschreiben die Massenindividualisierung gar als neues Paradigma für die heutige Produktion [PINE99, S. 7]. Um die von der Individualisierung induzierte Komplexität zu beherrschen, greifen Hersteller bei der Architektur der Produkte auf Baukasten- und Modularisierungskonzepte zurück [SCHUH, S. 58 f.]. Ziel ist es hier, die für die Produktdifferenzierung irrelevanten Bauteile aus für mehrere Varianten gemeinsam entwickelten Baukästen zur Verfügung zu stellen und die Unterscheidung durch möglichst wenige, variantenspezifische Bauteile zu erreichen. Dabei ist ein steigender Anteil von zugekauften Basis Komponenten zu verzeichnen. Nur spezifische Umfänge werden als Kernkompetenz

im eigenen Haus gefertigt [VDA12, S. 3]. Als Folge der Individualisierung hat sich die Anzahl der Teilenummern eines Fahrzeuges in den letzten zehn Jahren verdoppelt. Mit der Teilezahl steigt gleichzeitig die Anzahl der notwendigen Verbindungen. Bei der Auswahl der Verbindungstechnik genügt es nicht, ausschließlich die Anforderungen eines Produkts zu beachten, vielmehr sind die Anforderungen einer ganzen Produktfamilie zu berücksichtigen [SEDCHAICHARN10, S. 19].

Auswirkungen der Verbindung auf den Produktionsprozess

Der Deutsche Verband für Schweißtechnik quantifiziert die jährliche Wertschöpfung durch Fügetechnik in der Bundesrepublik Deutschland auf 27 Mrd. €, erbracht durch 640.000 Beschäftigte. Damit war im Jahr 2005 jeder 16. Arbeitsplatz direkt damit verknüpft [VDI Nachrichten Nr. 3905]. Im Bereich der metallverarbeitenden Industrie entfallen rund 50 % der Fertigungszeit auf die Montage von Produkten [EHRLENSPIEL92, S. 182], Bauer beschreibt die Montage somit als wichtigste industrielle Produktionstechnik [BAUER91, S. 1]. Negative Effekte der Komplexität auf die Montage auszuschließen [FISHER95, S. 123 ff.; MACDUFFIE96, S. 350 f.; FISHER99, S. 771] und die Variantenvielfalt in der Produktion kosteneffektiv abzubilden, wird in Zukunft einer der entscheidenden Einflussfaktoren auf dem Weltmarkt sein [MACDUFFIE96, S. 350]. Daher kommt der Beeinflussung der Produktentwicklung hinsichtlich der Produktionsanforderungen, besonders im Hinblick auf die Verbindungstechnik [EHRLENSPIEL92, S. 180; L'EGLISE01, S. 324; BLUEZE10, S. 90], eine große Bedeutung zu.

1.1.2 Relevanz der Auswahl und Gestaltung der Verbindung

Entsprechend der beschriebenen Einflüsse der Verbindung auf das Produkt und den Produktionsprozess bestimmen Zielgrößen und Zeitpunkt der Auswahl sowie Gestaltung der Verbindung in großem Maße die Produkteigenschaften und Produktionsaufwendungen.

Zielgrößen der Auswahl

Neben dem übergeordneten Kriterium der Funktionalität der Verbindung lassen sich die Zielgrößen bei der Auswahl der Verbindung in das Zieldreieck Kosten, Zeit und Qualität einordnen. Dabei beschreiben die Kosten die Einzelteilkosten der für die Verbindung notwendigen Verbindungselemente. Neben den Einzelteilkosten spielen die Fertigungszeiten eine entscheidende Rolle bei der Wirtschaftlichkeit einer Verbindung.

Designkriterien wie die Sichtbarkeit von Schraubenköpfen und die Positioniergenauigkeit von Bauteilen lassen sich den Qualitätskriterien zuordnen.

Zeitpunkt der Auswahl

Die größte Möglichkeit der Kostenbeeinflussung bietet sich während der Klärung der Aufgabenstellung und der Konzeption. Ehrlenspiel beschreibt in diesem Kontext einen Zielkonflikt, welchem sich die Konstrukteure in dieser Phase stellen müssen: die Möglichkeit der Kostenbewertung ist in den frühen Phasen nur zu einem geringen Maße gegeben, wodurch die Auswahl einer Lösung aus dem Lösungsraum erschwert wird [EHRENSPIEL07, S. 13] (vgl. Bild 1.1).

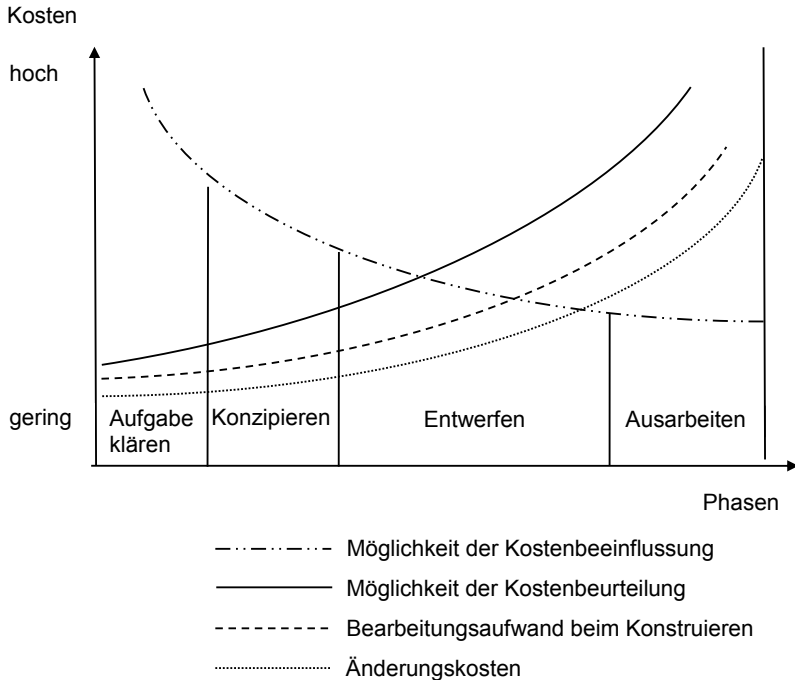


Bild 1.1: Phasen des konstruktiven Entwurfsprozesses nach [EHRENSPIEL07, S. 13]

Mit zunehmender Konkretisierung und Verbesserung der Kostenbewertung sinkt die Möglichkeit der Kostenbeeinflussung. Werden bei der Auswahl der Verbindungen keine Grundbedingungen und Einschränkungen berücksichtigt, greift die von Lewandowski beschriebene Problemspirale (vgl. Bild 1.2). Diese zeigt auf, dass bei

unzureichender Unterstützung der Suche nach Teilen neue Teile angelegt werden, was die Teilevielfalt erhöht und die bei der nächsten Entscheidung zu berücksichtigende Teilevielfalt weiter steigen lässt. Damit wächst bei der nächsten Schleife der Aufwand zur Suche abermals, wodurch die Wahrscheinlichkeit, dass aufgrund eines nicht befriedigenden Suchergebnisses ein neues Teil angelegt wird, ebenfalls zunimmt. Diese Problemspirale lässt sich auch auf Verbindungen und Verbindungselemente übertragen (vgl. Bild 1.2).

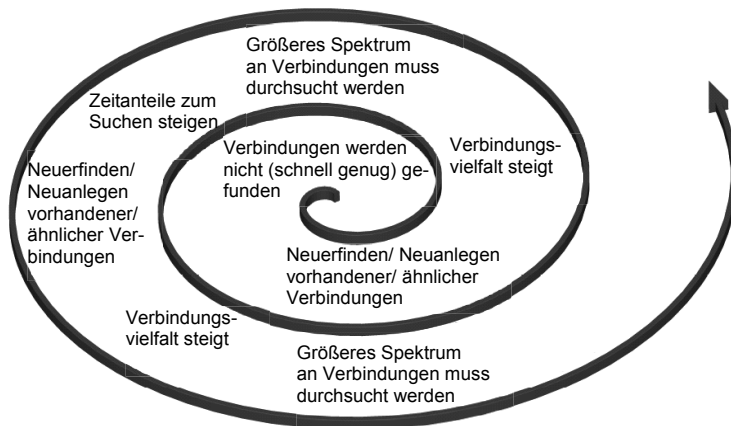


Bild 1.2: Problemspirale nach Lewandowski bei der Suche von Teilen, übertragen auf die Auswahl von Verbindungen [LEWANDOWSKI00, S. 23]

Neben der beschriebenen Minimierung der Zunahme des Teilespektrums hat das Wiederverwenden konkreter Lösungen auch aus konstruktiver Sicht einen positiven Effekt: Die Anzahl der iterativen Änderungen wird damit verringert [VÖLCKERS78, S. 14 ff.].

1.1.3 Relevanz der Unterstützung bei der Auswahl und Gestaltung der Verbindung

Der Zeitbedarf für die Informationssuche nimmt aufgrund der Menge der Informationen sowie der zu berücksichtigenden Randbedingungen zu und stellt damit eine zentrale Größe im Konstruktionsprozess dar [GRABOWSKI87, S. 23]. Entsprechend einer Studie des Werkzeugmaschinenlabors (WZL) der RWTH Aachen verlieren 90 % der Unternehmen ein Zehntel ihres Innovationspotenzials aufgrund des Zeitbedarfs für die

Informationssuche [Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) der RWTH04], beziehungsweise wird Verbesserungspotenzial durch die Übernahme von bewährten Lösungen [KLETT09, S. 1] nicht erschlossen. Dieser Faktor wird aufgrund der steigenden Anforderungen und kürzeren Entwicklungszyklen [VDI93, S. 7] weiter an Ergebniswirksamkeit gewinnen. So halbierte sich die Entwicklungszeit eines Automobils von neun Jahren in den 90er-Jahren auf derzeit vier bis fünf Jahre [WEMHÖNER05, S. 47].

1.2 Problemstellung

Die Auswahl und Gestaltung der Verbindungen bedarf methodischer Unterstützung, um die durch die Verbindungen induzierten Produkteigenschaften zu optimieren, die Produktivität bei der Verbindung der Bauteile zu erhöhen, den Zeitbedarf für die Informationssuche im Konstruktionsprozess zu verringern und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen zu steigern.

Dabei sind drei Teilprobleme voneinander abzugrenzen: Die Bestimmung der optimalen Verbindung hinsichtlich der gewählten Zielgrößen (Ziel), die Sicherstellung eines effizienten Konstruktionsprozesses (Weg zum Ziel) sowie die Reproduzierbarkeit der Zielerreichung (Eindeutigkeit des Wegs zum Ziel).

Optimale Verbindung

Bei der Suche nach der optimalen Verbindung ist durch den Konstrukteur ein multi-kriterielles Problem zu lösen. Die Erfüllung der funktionalen Anforderungen steht dabei in der Praxis oftmals allein im Vordergrund [ANDERSON08, S. 79] und ist, wie Alink beschreibt, die Motivation der Ingenieure [ALINK10, S. 5]. Daneben sind jedoch eine Vielzahl weiterer Bedingungen und Wirkzusammenhänge wie Kosten, Fertigungszeit, Qualität und Recyclingfähigkeit zu berücksichtigen.

Legt man der Auswahl und Gestaltung von Verbindungen die Definition eines idealen Systems nach Altschuller zugrunde, hat jede Entscheidung für eine Verbindung unerwünschte Konsequenzen zur Folge [BAUER09, S. 1], da das ideale System die gewünschte Funktion zur Verfügung stellt, ohne selbst zu existieren [ALTSCHULLER98, S. 23]. Die unerwünschten Aufwendungen, die durch eine Verbindung verursacht werden, gilt es produktspezifisch gegeneinander abzuwägen und bei der Auswahl der Verbindung zu berücksichtigen. Die von Ehrlenspiel als Grundlage für die Auswahl beschriebenen Funktionskosten (Quotient aus Kosten und Nutzen einer Verbindung) [EHRLENSPIEL07, S. 262] zeigen die Herausforderung sehr deutlich: Für zwei gegebene

Bauteile erfüllen unterschiedliche Verbindungen stets denselben Nutzen: Sie stellen den Zusammenhalt zwischen den zu verbindenden Bauteilen her. Dabei können neben der zu übertragenden Kraft auch weitere Faktoren wie Sicherheit, Zuverlässigkeit, Lösbarkeit und Dichtheit Bestandteil der Anforderungen sein. Eine Verbindung ist nur dann von Nutzen, wenn sie alle Anforderungen erfüllt. Damit ergibt sich der Nutzen als ein binärer Wert (1: Verbindung erfüllt alle Anforderungen; 0: Verbindung erfüllt die Anforderungen nicht), wodurch der Kennwert zur Bewertung einer möglichen Verbindung als Quotient aus Nutzen und Kosten allein durch die verursachten Kosten bestimmt wird.

Für viele Produkte kann der Quotient aus Kosten und Nutzen bei der Suche nach der optimalen Verbindung herangezogen werden, jedoch ist die Ermittlung der Kosten einer Verbindung aufgrund der beschriebenen Interdependenzen in modernen Produktarchitekturen sehr aufwendig. Weiter sind neben den funktionalen, wirtschaftlichen und produktspezifischen Anforderungen auch die Auswirkungen auf die (Produktions-)Komplexität zu berücksichtigen.

Konstruktionsprozess

Die Notwendigkeit der Verbesserung der Unterstützung von Konstrukteuren bei der Auswahl und Gestaltung von Verbindungen begründet sich hauptsächlich in zwei Punkten:

1. Der Problemlösungsprozess ist nicht kontinuierlich, allgemeine Regeln zum Übergang zwischen den einzelnen Stufen gibt es nicht und werden daher projektspezifisch festgelegt [ALBERS11, S. 204].
2. Die Bekanntheit, Verbreitung und Durchdringung von Methoden aus der Wissenschaft ist in der Praxis nicht oder nicht ausreichend gegeben [GEIS08, S. 369; LÓPEZ-MESA11, S. 8].

Gründe für den geringen Einsatz bestehender Methoden sind sowohl bei den Entwicklern der Methoden als auch bei den Anwendern der Methoden zu suchen:

- Aufgrund einer zu großen Distanz zwischen Entwickler und Anwender sind die Methoden oftmals zu wenig auf die Bedürfnisse und Anforderungen der Anwender ausgelegt [GEIS08, S. 370; LÓPEZ-MESA11, S. 8]
- Das Erlernen der Methoden ist zu aufwendig [LÓPEZ-MESA11, S. 8]
- Die Methoden sind auf unterschiedliche Medien verteilt [BAUER09, S. 1]

Um den Aufwand bei der Auswahl der Verbindung für den Konstrukteur überschaubar zu halten und dabei gleichzeitig die Berücksichtigung und Bewertung aller funktional möglichen Verbindungen zu gewährleisten, bedarf es jedoch methodischer Unterstützung. Bereits in den 1970er-Jahren forderte der Verein Deutscher Ingenieure dazu geeignete Hilfsmittel [VDI75, S. 2 f.]. Diese sind jedoch bis heute nicht in ausreichendem Maße vorhanden.

Reproduzierbarkeit

Die Entwicklung komplexer Produkte ist heutzutage von einer starken Arbeitsteilung gekennzeichnet. Bauteilverantwortliche entwerfen vermehrt eine Baugruppen für unterschiedliche Baureihen, um Synergieeffekte zu erzielen (vgl. Kapitel 1.1.2).

Aus der Arbeitsteilung resultiert neben den Vorteilen im Konstruktionsprozess auch eine Reihe von Problemen. Die Reproduzierbarkeit von konstruktiven Lösungen stellt eine der größten Herausforderungen bei der Auswahl und Gestaltung von Verbindungen dar, da sie notwendige Voraussetzung für die Verhinderung einer weiteren Zunahme des Teilespektrums und damit der Erhöhung der Komplexität in allen Unternehmensbereichen ist.

Konfrontiert man verschiedene Konstrukteure unabhängig voneinander mit demselben Gestaltungsproblem, so ist es sehr wahrscheinlich, dass die Anzahl der unterschiedlichen Lösungen der Anzahl der befragten Konstrukteure entspricht. Aufgrund des sehr großen Lösungsraums (für eine einfache Verbindungsaufgaben sind bereits mehr als 10.000 unterschiedliche Verbindungen möglich [RUSITSCHKA11, S. 105]) ist dies nahezu nicht auszuschließen. Dazu kommt, dass sich die Arbeitsweise der Konstrukteure in der Praxis deutlich unterscheidet und auch der messbare Erfolg verschieden ist [JÄNTSCH07, S. 269; BENDER04, S. 216]. Die Übertragung von Lösungen von einem Anwendungsfall auf andere ähnliche Anwendungsfälle ist nur zum Teil gegeben [MONTALBO10, S. 127].

Dies macht die Weiterentwicklung der Unterstützung der Auswahl und Gestaltung von Verbindungen notwendig, da es keine ausreichende methodische Unterstützung zur Berücksichtigung der Produktionsbelange in der Entwicklung gibt [MEERKAMM11, S. 55; BLUEZE10, S. 91; EHRENSPIEL92, S. 180].

Trends

Die beschriebene Relevanz der Verbindung und deren Auswahl im Konstruktionsprozess (vgl. Kapitel 1.1.1–1.1.3) wird durch die globalen Megatrends der Individualisierung und Ressourcenknappheit weiter verstärkt.

Mit der Vielzahl unterschiedlicher Produkte und Individualisierungsmöglichkeiten repräsentiert die Automobilindustrie die variantenreiche Serienfertigung in einer außerordentlichen Ausprägung sowohl in Bezug auf den Variantenreichtum als auch auf die Stückzahl. Als Folge der aus dem Variantenreichtum induzierten Komplexität reduzieren die aktuell am Markt befindlichen Unternehmen seit mehr als 30 Jahren die Fertigungstiefe kontinuierlich und verteilen diese damit auf die Zulieferer. Für die deutsche Automobilindustrie liegt diese derzeit bei 20–25 % (vgl. Bild 1.3). Die von den OEM erbrachte Wertschöpfung konzentriert sich dabei auf Umform-, Beschichtungs- und Verbindungsprozesse. Die Wirtschaftlichkeit dieser Prozesse hat damit zukünftig einen großen Einfluss auf den Erfolg des Gesamtunternehmens.

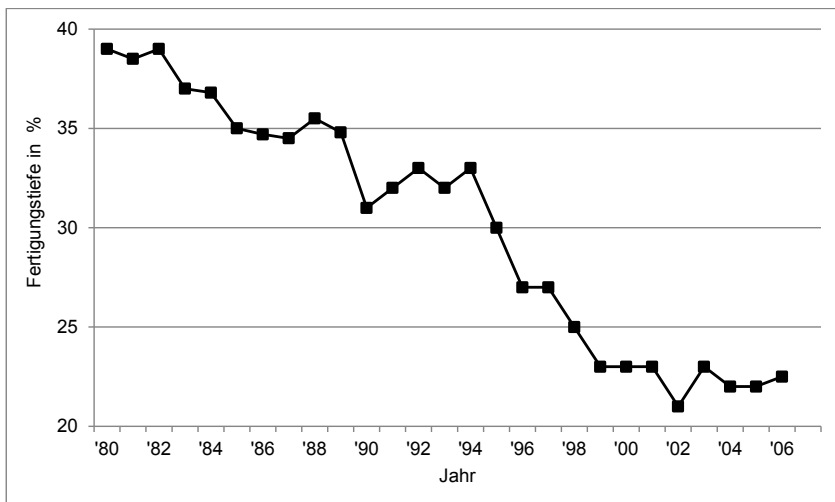


Bild 1.3: Fertigungstiefe in der deutschen Automobilindustrie [GHASSEMIEH11, S. 78]

Weiter trägt der globale Megatrend der Nachhaltigkeit, forciert durch steigende Mineralölpreise, dazu bei, dass die Steigerung der Effizienz und Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei der Entwicklung von Automobilen immer weiter in den Vordergrund

rückt. Konkurrieren derzeit effiziente Verbrennungsmotoren mit alternativen Antriebskonzepten wie Hybridantrieb, batterieelektrischem Fahren und Brennstoffzellen, so ist, von dem Antriebskonzept losgelöst, das Gewicht ein entscheidender Faktor für die Effizienz eines Fahrzeuges. Die Reduktion des Fahrzeuggewichts um 10 % führt, abhängig von dem Antriebskonzept, zu einer Verbrauchsverringerung zwischen 2 und 6 % [ESPIG06, S. 1090].

Seit den 1970er-Jahren steigt das Fahrzeuggewicht aufgrund von Verbesserungen der Sicherheit und des Ausstattungsumfangs (Funktion und Komfort) stetig (vgl. Bild 1.4).

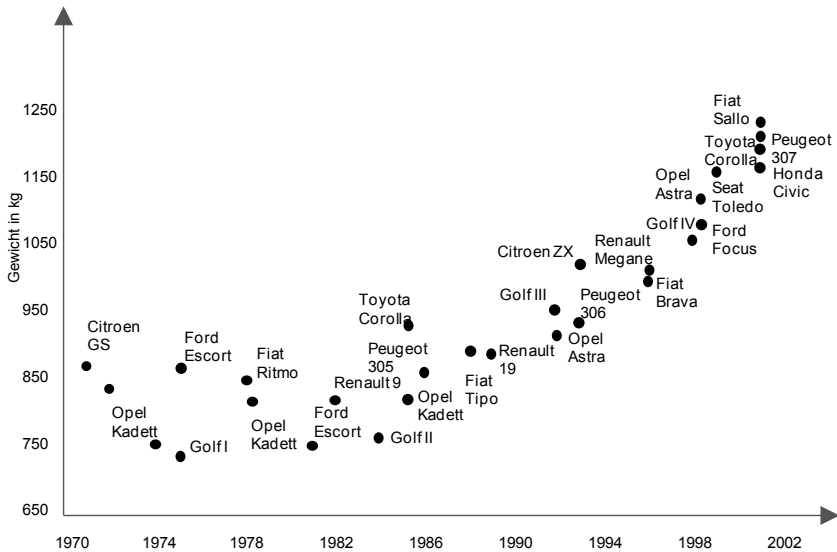


Bild 1.4: Entwicklung des Gewichts von Kompaktwagen [FKA02]

Mit dem Einsatz neuer, leichter Materialien arbeiten Hersteller gegen diesen Trend an. Nach dem verstärkten Einsatz von Aluminium seit den 1990er-Jahren zeichnet sich aktuell ein Trend hin zu Verbundwerkstoffen ab [GHASSEMEH11, S. 368]. Die Integration dieser Materialien in die bestehenden Produktarchitekturen bedeutet eine große Herausforderung für die Verbindungstechnik, da bestehende Lösungen nicht oder nur eingeschränkt auf die neuen Werkstoffe übertragen werden können [HAGE09, S. 42]. Eine detaillierte Betrachtung der Trends und ihrer Auswirkungen auf die Produktion findet sich in Kapitel 2.1.2.

1.3 Forschungslücke

Derzeit sind in Wissenschaft und Praxis keine Methoden bekannt, welche die beschriebenen Anforderungen an die Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung vollständig erfüllen. Bestehenden Ansätzen zur Unterstützung der Auswahl fehlt es insbesondere an der Berücksichtigung der Besonderheiten neuer Werkstoffe und Verbindungstechniken sowie der Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Verbindungen. Dies hat zur Folge, dass innovative Materialien und Verbindungen selten zum Einsatz kommen und die Gefahr besteht, dass Verbindungen ausgewählt werden, die nicht das wirtschaftliche Optimum darstellen.

Die Beschreibung der zukünftigen Handlungsfelder bei der Produktgestaltung von Ashby [ASHBY04, S. 62 ff.] zeigt die Relevanz der Unterstützung:

- Prozessauswahl und Modellierung
- Identifikation von Anwendungen für neue Materialien
- Berücksichtigung des Lebenszyklus
- Vernetzung der Werkzeuge zur Auswahl von Material und Fertigungsprozess mit geometrischen Modellierungs- und Auslegungswerkzeugen
- Multimaterial Auswahl
- Auswahl funktionaler Materialien

Der Gewährleistung der Auswahl der wirtschaftlichsten Verbindung für das gegebene Problem kommt heute bereits eine große Bedeutung zu. Diese wird sich aufgrund der beschriebenen Trends in der variantenreichen Serienfertigung noch weiter verstärken. Das Schließen der Forschungslücke birgt daher nicht nur in wissenschaftlicher Hinsicht großes Potenzial, sondern auch in Bezug auf die Anwendung in der Industrie.

1.4 Zielsetzung und Forschungsfragen

Mit der Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung wird die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Verbindungsprozesse in der Produktion um 5–10 % angestrebt.

Dementsprechend adressiert die Arbeit folgende drei Forschungsfragen:

1. Wie lässt sich eine Verbindung zwischen zwei Bauteilen beschreiben, sodass daraus alle im Lösungsraum existenten Alternativen abgeleitet werden können?
2. Wie lassen sich alle im Lösungsraum enthaltenen Verbindungen ermitteln und bewerten?

3. Kann die entwickelte Methodik den Konstruktionsprozess von Verbindungen vereinfachen sowie reproduzierbar machen und dabei die Auswahl und Auslegung der Verbindungen entsprechend der Wirtschaftlichkeit verbessern?

Damit beinhaltet die Arbeit theoretische und praktische Gesichtspunkte. Die theoretischen Aspekte beziehen sich auf die Untersuchung bestehender Ansätze in Literatur und Wissenschaft. Bei der Betrachtung der Praxis sind zwei Perspektiven zu berücksichtigen: Entwicklung und Produktion. Die Problemanalyse gliedert sich daher in zwei Teile: Die Untersuchung des Entwicklungsprozesses und die Analyse der Produktionsaufwendungen bei der Verbindung von Bauteilen.

Die wissenschaftstheoretische Einordnung liefert Basis und Struktur für den Aufbau der Arbeit.

1.5 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Struktur

Wissenschaftstheorie, auch Wissenschaftswissenschaft genannt, beschäftigt sich mit der theoretischen Klärung der Voraussetzungen, Strukturen und Ziele wissenschaftlicher Aussagen, Methoden sowie Systembildung [Brockhaus90, S. 123].

Dabei wird die Wissenschaft als das menschliche Denken beschrieben, welches in bestimmten spezialisierten Institutionen nach dort bestimmten Regeln (Kriterien, Ansprüche) stattfindet und als Ergebnis „wissenschaftliche Erkenntnis“ hat. Die Wissenschaft erstreckt sich entsprechend dem menschlichen Denken über alle Bereiche der sinnlichen Wahrnehmung. Die Erstellung einer Wissenschaftssystematik ermöglicht es, spezifische Probleme einer Wissenschaftskategorie zuzuordnen [ULRICH76, S. 305]:

Auf oberster Ebene erfolgt die Unterscheidung zwischen Formal- und Realwissenschaften. Formalwissenschaften (u. a. Philosophie, Logik, Mathematik) beschäftigen sich mit der Entwicklung von Sprachen und Zeichensystemen sowie von Regeln zur Verwendung. Realwissenschaften beschäftigen sich mit der Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte und bedingen dabei die Formalwissenschaften. Innerhalb der Realwissenschaften lassen sich die reinen und die angewandten Wissenschaften unterscheiden. Reine Wissenschaften (u. a. Naturwissenschaften), auch als Grundlagenwissenschaften beschrieben, haben ein theoretisches Ziel und fokussieren auf die Erklärung von Wirklichkeitsausschnitten mittels Erklärungsmodellen. Angewandte Wissenschaften (u. a. Ingenieurwissenschaften, angewandte Sozialwissenschaften, Betriebswirtschaftslehre), auch als

Handlungswissenschaften beschrieben, haben ein praktisches Ziel und fokussieren auf die Analyse und Entwicklung menschlicher Handlungsalternativen zwecks Gestaltung sozialer und technischer Systeme [ULRICH76, S. 305 f.].

Im Sprachgebrauch wird Wissenschaft oftmals mit Grundlagenwissenschaft gleichgesetzt und die Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse z. B. im Bereich der Medizin, Technik, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften dabei überwiegend der Praxis zugeordnet [ULRICH01a, S. 169]. Jedoch gelten die beiden Grundprobleme des realwissenschaftlichen Denkens, das Subjektivitäts- und das Kommunikationsproblem sowohl für die Grundlagen- als auch für die Handlungswissenschaften und geben entsprechende Regeln vor [ULRICH76, S. 306]:

- Beobachtungsregeln: Begrenzung der Subjektivität durch Ausschalten oder Kontrolle des Wahrnehmungsfilters
- Wertefreiheitsregeln: Vermeidung von Interessensbezügen oder deren Offenlegung
- Sprachregeln: Abbildung der Realität durch gemeinsame, präzise Sprache
- Induktionsregeln: Begrenzung der Verallgemeinerungsfähigkeit von Einzelaussagen

Neben den beschriebenen Gemeinsamkeiten lassen sich zwischen den angewandten und den reinen Wissenschaften jedoch auch deutliche Unterschiede in Bezug auf wissenschaftstheoretische und forschungsmethodische Merkmale beschreiben [ULRICH01a, S. 171]. Diese lassen sich anhand des Entstehungs-, Begründungs- und Anwendungszusammenhangs, wie in Tabelle 1.1 gezeigt, beschreiben:

	Wissenschaftstheorie	Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung
Entdeckungszusammenhang (EZ)	<p>Reine Wissenschaft:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diskrepanzen zwischen Theorie und Beobachtung • kein direkter Bezug zu einem Problem aus der Praxis notwendig <p>Anwendungsorientierte Wissenschaft:</p> <ul style="list-style-type: none"> • kein befriedigendes Wissen zur Lösung zur Verfügung • Kriterien wie Sicherheit, Kostenminimierung, Haltbarkeit [ULRICH01a, S. 172] 	<ul style="list-style-type: none"> • In Erzeugnissen der variantenreichen Serienfertigung finden sich Verbindungen, welche nicht dem technischen und wirtschaftlichen Optimum entsprechen. • Bestehende Lösungen unterstützen die Auswahl der Verbindung im Konstruktionsprozess nicht ausreichend. • Kriterium für die Bewertung einer funktional möglichen Verbindung ist deren Wirtschaftlichkeit.
Begründungszusammenhang (BZ)	<p>Reine Wissenschaft:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Konfrontation der Hypothesen mit Beobachtungen der Realität • Grundlage zur Ermittlung der Gültigkeit von Theorien, Hypothesen und Erklärungen (Falsifikationsversuch) <p>Anwendungsorientierte Wissenschaft:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausgangspunkt für Problemlösung [ULRICH01a, S. 173] 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausgangspunkt für die Problemlösung ist die in der variantenreichen Serienfertigung zum Einsatz kommende Verbindungstechnik.
Verwendungszusammenhang (VZ)	<p>Reine Wissenschaft:</p> <ul style="list-style-type: none"> • untergeordneter Bedeutung <p>Anwendungsorientierte Wissenschaft:</p> <ul style="list-style-type: none"> • im Fokus [ULRICH01b, S. 306] 	<ul style="list-style-type: none"> • Ziel der Verwendung der Unterstützung zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung ist die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit dieser Verbindungen.

Tabelle 1.1: Entstehungs-, Begründungs- und Verwendungszusammenhang nach [ULRICH01a]

1.5.1 Einordnung der Arbeit

Der praktische Erfahrungshintergrund des Verfassers aus Tätigkeiten in der betrieblichen Praxis unterschiedlicher Unternehmen der Automobil(zuliefer-)industrie und die dabei gewonnenen Erkenntnisse über Potenziale sowie der wissenschaftliche Diskurs auf dem Gebiet des Methodischen Konstruierens und der Wissensverarbeitung in der Produktentwicklung stehen in enger Beziehung mit dem Entstehungszusammenhang der vorliegenden Arbeit. Ziel der Arbeit ist es, die erkannten Probleme (Entstehung im Praxiszusammenhang) durch Handlungsalternativen zu verbessern. Im Vordergrund steht der Verwendungszusammenhang mit der Frage nach dem Zweck und Nutzen der erarbeiteten wissenschaftlichen Erkenntnis (Nutzenkriterium). Entsprechend der damit einhergehenden wissenschaftstheoretischen Einordnung in den Bereich der angewandten Realwissenschaften wird ein an Ulrich angelehnter Forschungsansatz gewählt, bei welchem auf die Phasen mit Praxiszusammenhang besonderes Augenmerk gelegt werden [ULRICH01a, S. 194].

1.5.2 Aufbau und Gliederung

Entsprechend der Zuordnung der Arbeit zu den angewandten Realwissenschaften orientiert sich der Aufbau an der von [ULRICH01a] dafür beschriebenen Gliederung (vgl. Bild 1.5).

Die dieser Gliederung zugrunde liegende Forschungskonzeption und -methode sieht den Ursprung des Forschungsprozesses nicht in der Theorie mit der Prüfung von Hypothesen, sondern in der Praxis mit der Untersuchung des Anwendungszusammenhangs (vgl. Bild 1.5), wo der Forschungsprozess auch endet. Damit bilden die Phasen mit direktem Praxisbezug (Phasen 1, 4, 6 und 7) mit der Erfassung und Typisierung praxisrelevanter Probleme, der Erfassung und Untersuchung des relevanten Anwendungszusammenhangs sowie dessen Prüfung in dieser Arbeit die wissenschaftliche Hauptaufgabe [ULRICH01a, S. 194].

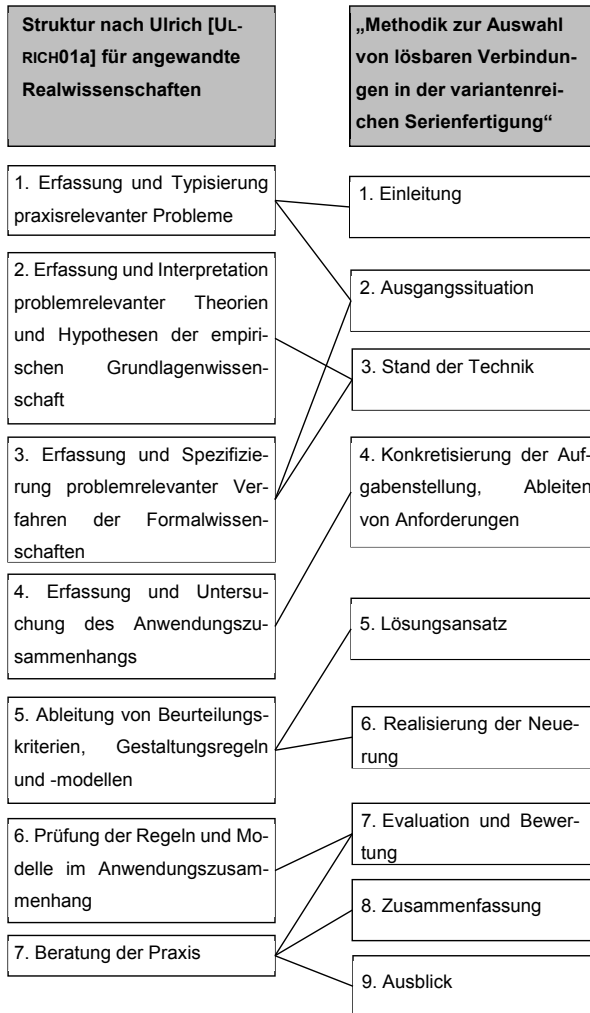


Bild 1.5: Struktur der Arbeit entsprechend der wissenschaftstheoretischen Einordnung

2 Ausgangssituation

Die beschriebenen Beobachtungen aus der Praxis beziehen sich auf eine im Zeitraum von 2010 bis 2013 durchgeführte Analyse der Produkte, Produktionsprozesse und Produktentwicklungsprozesse eines Industrieunternehmens der Automobilbranche. Entsprechend der Forschungskonzeption (vgl. Kapitel 1.5) liegt der Schwerpunkt der Analyse auf der Untersuchung und Erfassung des Anwendungszusammenhangs in der Produktion und Entwicklung.

Dazu werden die in der Produktion aktuell zum Einsatz kommenden Verbindungen dargestellt, geordnet und analysiert (vgl. Kapitel 2.1). Die Ergebnisse der Analyse zeigen die Komplexität einer aktuellen automobilen variantenreichen Serienfertigung und liefern als Vergleichsbasis die Voraussetzung für die Evaluierung der erarbeiteten Alternativlösungen.

Im Bereich der Entwicklung werden zwei Teilaspekte untersucht: Die Prozesse bei der Auswahl der Verbindungstechnik (vgl. Kapitel 2.2) und die Werkzeuge zur Unterstützung der Auswahl der Verbindungstechnik (vgl. Kapitel 2.3). Zusammen ergeben diese Untersuchungen sowohl eine vollständige Prozessbeschreibung mit den zeitlichen Abhängigkeiten als auch die Übersicht der an dem Prozess beteiligten Personen und deren Beziehungen zueinander.

2.1 Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung

Entsprechend der aufgezeigten Trends und der daraus resultierenden zunehmenden Anzahl an Bauteilen kommt der Verbindungstechnik eine steigende Bedeutung zu. Jedes Bauteil benötigt zu seinem Nachbarbauteil eine Verbindung. Dabei kann es sich um eine feste oder lose Verbindung handeln. Feste Verbindungen, wie z. B. Schraubverbindungen, bezeichnen dabei Verbindungen, welche die Bewegung zwischen den verbundenen Bauteilen verhindern [EHRENSPIEL07, S. 261], während lose Verbindungen, wie z. B. Lager, Bewegungen zwischen diesen zulassen.

Feste Verbindungen lassen sich weiter in lösbare, bedingt lösbare und unlösbare Verbindungen aufteilen (vgl. Bild 2.1):

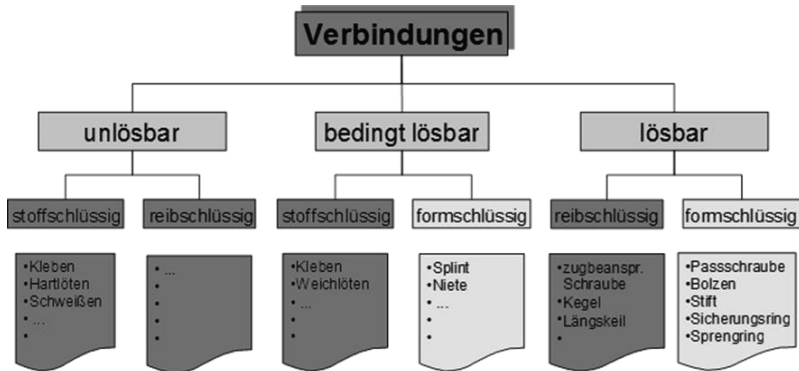


Bild 2.1: Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung [BINZ14, S. 7-5]

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden feste, lösbare Verbindungen untersucht, welche in der automobilen Montage den Schwerpunkt bilden.

2.1.1 Lösbare Verbindungen in der automobilen Montage

Zur Strukturierung und Eingliederung der in der automobilen Montage zum Einsatz kommenden Verbindungen wird die Beschreibung der Funktionen in der Montage von Lotter [LOTTER06, S. 2] verwendet. Montageprozesse lassen sich entsprechend dieser in die Teilfunktionen Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren und Sonderoperationen aufgliedern (vgl. Bild 2.2).

Die Prozesse zur Verbindung von Bauteilen fallen dabei hauptsächlich in den Bereich des Fügens, wenngleich teilweise auch Handhabungs-, Kontroll- und Justagetätigkeiten notwendig sind. Die daraus resultierenden Aufwendungen sind bei der ganzheitlichen Ermittlung der Kosten ebenfalls zu berücksichtigen und werden daher in der Prozessanalyse (vgl. Kapitel 2.2) näher beschrieben.

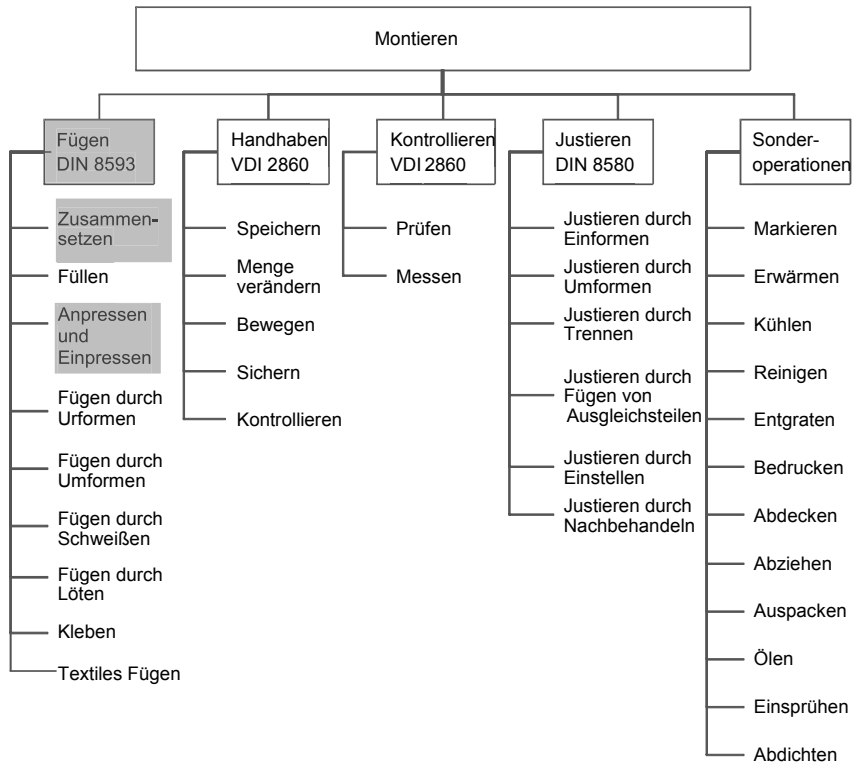


Bild 2.2: Funktionen in der Montage nach Lotter [LOTTER06, S. 2] (grau markiert die in der Arbeit betrachteten Umfänge)

Zur Strukturierung der lösbaren festen Verbindungen in der automobilen Montage wird die Deutsche Industriennorm DIN 8593 für das Fertigungsverfahren Fügen [HOLBERY06] verwendet. Entsprechend dieser lassen sich die in der automobilen Montage zum Einsatz kommenden Verbindungen zwei Untergruppen zuordnen:

- Zusammensetzen (vgl. Kapitel 4.1)
- Anpressen/ Einpressen (vgl. Kapitel 4.3)

Für die weitere Untersuchung wurde das in der DIN 8593 beschriebene Ordnungsschema verfeinert, sodass die einzelnen Montageverbindungen voneinander abgegrenzt werden können (vgl. Tabelle 2.1). Die Granularität wurde dabei mit Blick auf die

Bewertung der Aufwendungen so gewählt, dass eine ganzheitliche Ermittlung möglich wird.











Kategorie	Unterkategorie 1	Unterkategorie 2	Verbindungstechnik	Bild
4 Fügen	4.1 Zusammen- setzen	4.1.6 federnd Einspreizen	Clip in Blechdurchzug	
			Clip in Fließloch	
			Clip auf Schweißbolzen	
			Clip in Loch (einzeln)	
			Clip in Loch (bauteilintegriert)	
	4.3 Anpressen/ Einpressen	4.3.1 Schrauben	Schraube in Blindnietmutter	
			Schraube in Nietmutter	
			Schraube in Stanzmutter	
			Schraube in Schweißmutter	
			Schraube in Spreizdübel/ Schnappmutter	

Tabelle 2.1: Lösbare Verbindungstechniken in der Automobilmontage 1/2











Kategorie	Unterkategorie 1	Unterkategorie 2	Verbindungstechnik	Bild
4 Fügen	4.3 Anpressen/ Einpressen	4.3.1 Schrauben	Schraube in Gewindeeinsatz	
			Schraube in Gewinde	
			Selbstfurchende Schraube in Loch	
			Selbstfurchende Schraube in Blechdurchzug	
			Selbstfurchende Schraube in Fließloch	
			Mutter auf Schweißschraube	
			Mutter auf Einpressbolzen	
			Mutter auf Blindnietbolzen	
			Mutter auf Schweißbolzen	
			Mutter auf Stanzbolzen	

Tabelle 2.1: Lösbare Verbindungstechniken in der Automobilmontage 2/2

Hier sind nicht nur die in der Montage anfallenden Aufwendungen, wie beispielsweise das Einschrauben einer Schraube in eine Schweißmutter, zu erfassen, sondern auch die vorgelagerten Prozessschritte, wie im oben beschriebene Beispiel das Einbringen der Durchgangslöcher in die Bauteile und der Schweißprozess zur Befestigung der Schweißmutter. Wie in Tabelle 2.1 ersichtlich, bilden Schraubverbindungen in Bezug auf die Anzahl der unterschiedlichen Verbindungstechniken den Schwerpunkt unter den Verbindungen der automobilen Montage.

Das beschriebene Ordnungsschema nutzend, wurde eine Analyse der Schraubverbindungen eines Fahrzeuges der oberen Mittelklasse durchgeführt. Die Auswahl des Fahrzeuges erfolgte entsprechend zweier Kriterien:

1. Hohe Ausstattungsvielfalt (Quantifizierung der aus der Individualisierung resultierenden Effekte)
2. Sehr große Stückzahl (konstruktive Entscheidungen haben aufgrund der hohen Stückzahlen große Auswirkungen auf Unternehmensergebnis)

Ermittelt wurde dabei die Gesamtanzahl der Schraubverbindungen, die Aufteilung auf die unterschiedlichen Typen von Schraubverbindungen und deren charakteristische Merkmale (Spezifizierung Verbindungselemente, Montageprozessgrößen, Dokumentationspflicht etc.).

Insgesamt wurden 1.384 Verschraubungen untersucht, die sich auf 665 Schraubfälle verteilen. Ein Schraubfall beinhaltet eine oder mehrere Schraubstellen und beschreibt die Schraubverbindung zwischen zwei oder mehreren Bauteilen vollständig. Neben der Spezifikation der zu verbindenden Bauteile werden auch Montageprozessgrößen wie Drehmoment, Drehwinkel und Kategorisierung der Verschraubung sowie die zu verwendenden Werkzeuge erhoben. Dabei standen Bauteilgewicht, Bauteilwerkstoff, Verbindungstechnik und die Anzahl der Befestigungsstellen im Fokus.

Bauteilgewicht

Die Masse der zu befestigenden Bauteile reicht von 16 g bis 25.000 g. Zur Clusterung der Massen wurde die Normzahlreihe R5 mit Faktor 1,6 [DIN74, S. 1] und einem Startwert von 100 g verwendet (vgl. Bild 2.3).

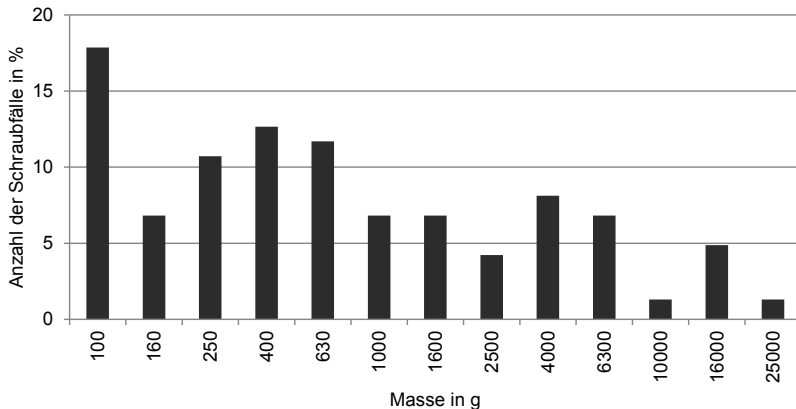


Bild 2.3: Anzahl der Schraubfälle pro Masse

Auffällig ist die Häufung der Befestigung von sehr leichten Bauteilen mit Schraubverbindungen. Mehr als die Hälfte der Bauteile (60 %) haben eine Masse von weniger als 1.000 g.

Bauteilwerkstoff

Hinsichtlich des Werkstoffs der befestigten Bauteile lassen sich zwei Auffälligkeiten ausmachen (vgl. Bild 2.4): Einerseits ist Kunststoff der am häufigsten verschraubte Werkstoff (36 %), was durch die große Anzahl an Elektronikkomponenten wie Sensoren, Steuergeräte und Kabelführungen zu erklären ist. Zum anderen lassen sich eingangs beschriebene Tendenzen zu Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium und hochfesten Stählen zeigen (vgl. 1.2). Bauteile aus Aluminium und hochfesten Stählen überwiegen mit 32 % die Bauteile aus Stahl (29 %). Können Verbindungen zwischen Bauteilen aus konventionellem Stahl kostengünstig mit thermischen Verbindungsverfahren wie dem Widerstandspunktschweißen ausgeführt werden, muss bei Hybridverbindungen häufig auf teure Schraubverbindungen oder mechanische Verbindungen wie das Stanznieten zurückgegriffen werden. Dies verdeutlicht die Herausforderung bei der Integration von Bauteilen aus Leichtbauwerkstoffen [HAGE09, S. 42].

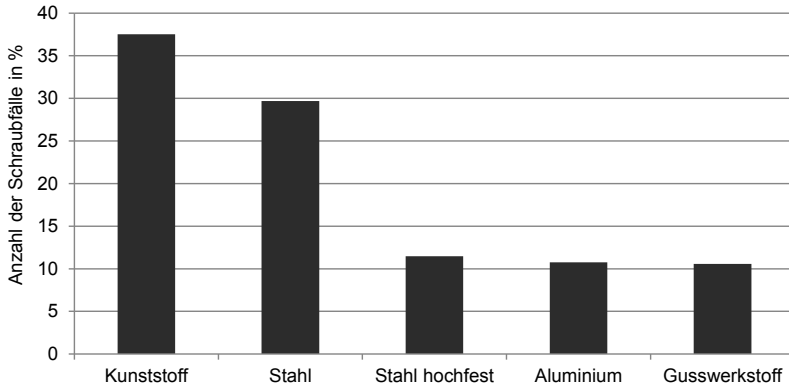


Bild 2.4: Anzahl der Schraubfälle pro Werkstoff des zu befestigenden Bauteils

Im Bereich des Automobilbaus werden die meisten Bauteile an der Karosserie selbst befestigt. Die Detailbetrachtung der mehr als 200 befestigten Kunststoffbauteile zeigt dies sehr deutlich (vgl. Bild 2.5). Untersuchungsgegenstand war eine Karosserie mit konventioneller Architektur, welche hauptsächlich aus Stahl besteht. Dies spiegelt sich auch in dem hohen Anteil an Kunststoffbauteilen wider (53 %), welche mit einem Stahlbauteil verschraubt werden. Für Fahrzeuge mit einem höheren Anteil an Aluminium oder anderen Leichtbauwerkstoffen verschiebt sich der geringe Anteil (1 %) dementsprechend zugunsten dieser Werkstoffe.

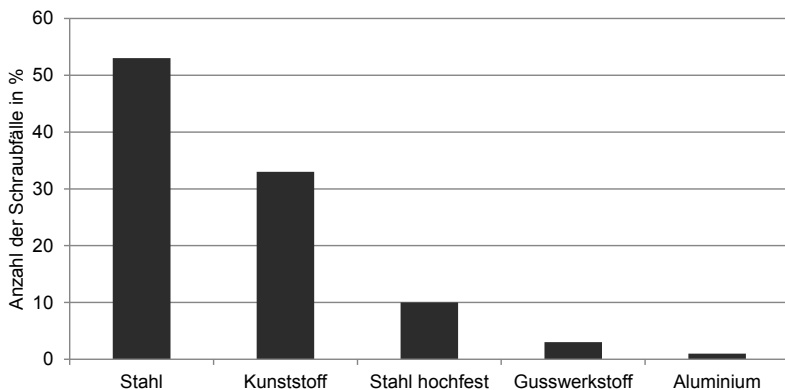


Bild 2.5: Anzahl der Schraubfälle pro Werkstoff des Trägerbauteils am Beispiel Kunststoff

Verbindungstechnik

Zur differenzierten Betrachtung der Verbindungstechniken wird die in Tabelle 2.1 beschriebene Clustering der lösbaren Verbindungen mit dem Fokus auf Schraubverbindungen genutzt. Entfallen der Großteil der Schraubfälle auf die Verbindungstechnik „Mutter auf Schweißbolzen (metrisches Gewinde)“ (19 %) und „Schraube in Schweißmutter“ (16 %), so verteilen sich die übrigen Schraubfälle nahezu gleichmäßig auf die übrigen Verbindungstechniken. Die Berücksichtigung von vierzehn unterschiedlichen Befestigungsarten verdeutlicht nochmals die durch die Verbindungstechnik hervorgerufene Komplexität in der Produktion.

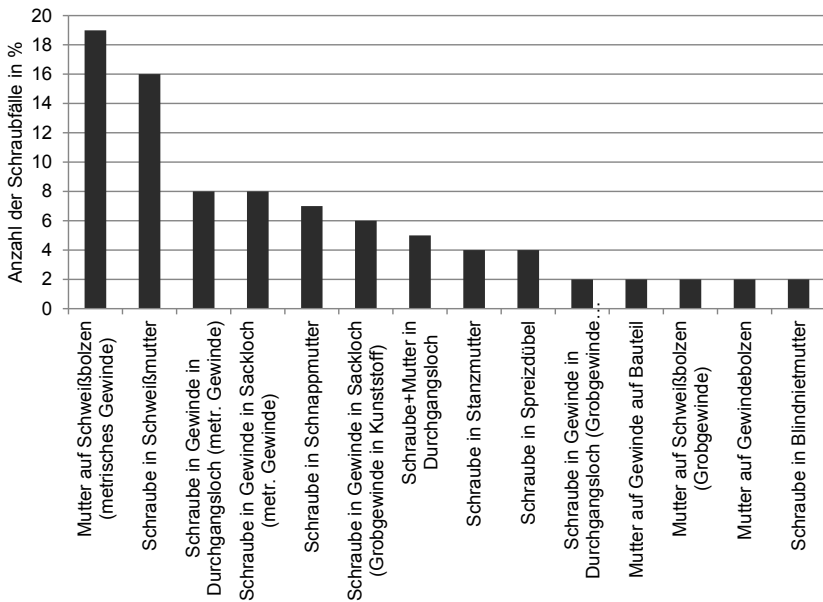


Bild 2.6: Anzahl der Schraubfälle pro Verbindungstechnik

Anzahl der Verbindungsstellen

Die Anzahl der Verbindungsstellen pro Schraubfall bewegt sich zwischen einer und 14 (vgl. Bild 2.7). Schraubverbindungen mit nur einer Schraubstelle sind am häufigsten, gefolgt von solchen mit zwei Schraubstellen. Die Detailanalyse zeigt jedoch, dass es sich bei diesen häufig um Hybridverbindungen handelt, bei welchen neben der Schraubverbindung ein weiteres geometrisches Element zur Verdrehungssicherung oder Abstützung genutzt wird.

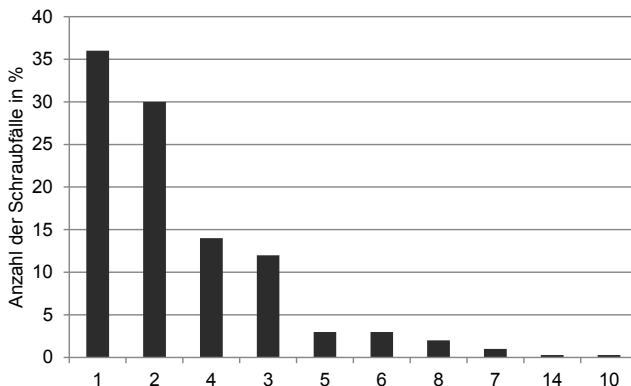


Bild 2.7: Anzahl der Schraubfälle pro Anzahl der Verbindungsstellen

Die Analyse der Schraubverbindungen eines Fahrzeugs zeigt die zu beherrschende Vielfalt sowohl bei den zu verbindenden Bauteilen als auch bei den verwendeten Verbindungen und damit die Notwendigkeit der methodischen Unterstützung bei deren Auswahl.

2.1.2 Trend bei eingesetzten Materialien und Verbindungen in der Automobilindustrie

Materialien

Die heute und zukünftig zum Einsatz kommenden Materialien können in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: Metalle und Verbundwerkstoffe.

Nach wie vor spielt bei den Metallen Stahl eine dominierende Rolle. Ein aktuelles Mittelklassefahrzeug besteht zu mehr als 60 % aus Stahl [GHASSEMEH11, S. 373].

Vorteile sind u. a. die geringen Kosten, die langjährige Erfahrung mit dem Material sowie die positiven Crasheigenschaften. Neue Legierungen sowie neue Umform- (Tailored Blanks, Hydroforming) und Fügeverfahren (Laserschweißen) für Stahlbauteile bieten weitere Möglichkeiten der Gewichtsreduktion. Neben der Verwendung von Stahl nimmt der Einsatz von Aluminium stetig zu. Fanden sich 1996 noch durchschnittlich 110 kg Aluminium in einem Fahrzeug, so wird sich dieser Wert bis 2015 auf 250 kg bis 340 kg (ohne/mit Strukturbauteile) mehr als verdoppeln [SEARS97]. Aluminium wurde bisher hauptsächlich für Gussbauteile (Motoren, Getriebe und Räder) sowie für Kühler verwendet. Darüber hinaus kommt Aluminium für Karosseriestrukturen und Beplankungen zum Einsatz, wo sich große Potenziale zur Gewichtsreduzierung verbergen [GHASSEMIEH11, S. 378]. Magnesium und Magnesiumlegierungen bieten zusätzliche Gewichtsvorteile gegenüber Aluminium, bedeuten jedoch für Konstruktion und Produktion eine Vielzahl von Herausforderungen [GHASSEMIEH11, S. 383].

Verbundwerkstoffe sind bereits seit den 1950er-Jahren in der Automobilbranche bekannt und wurden überwiegend für Kleinserien eingesetzt, bei welchen das Gewicht im Vordergrund stand. Die Übertragung auf die Mittel- und Großserie ist aufgrund von hohen Produktionskosten, zeitaufwändigen Fertigungsprozessen, geringer Energieaufnahme im Crashfall und Herausforderungen beim Recycling bislang nicht erfolgt. Die Kosten im Vergleich zu metallischen Werkstoffen sind derzeit um den Faktor 10 höher [GHASSEMIEH11]. Um die möglichen Gewichtseinsparungen dennoch zu nutzen, sind Hybridbauweisen aus unterschiedlichen Fasern anzustreben, bei welchen kostengünstige Fasern und Hochleistungsfasern wie Kohlefaser beanspruchungsgerecht kombiniert werden. Derzeit existieren keine Verbindungstechniken für Verbindungen zwischen Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen oder zwischen Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen und Metallbauteilen, welche die Anforderungen der automobilen Großserienfertigung in Bezug auf Stückzahl und Effizienz erfüllen. Für eine Großserientauglichkeit sind einerseits Verbindungstechniken zu entwickeln, welche über die bestehenden Klebeverbindungen hinausgehen, da diese die Anforderungen der Serienfertigung in Bezug auf die Taktzeit nicht erfüllen. Dazu sind parallel schnelle, sichere und kostengünstige Methoden zur Prüfung dieser zu entwickeln [GHASSEMIEH11, S. 387].

Unter den Faserverbundwerkstoffen lässt sich mit den Naturfaserverbundwerkstoffen eine weitere Gruppe beschreiben, welche in der Zukunft weiter an Bedeutung zunehmen wird [FRIEDRICH13, S. 368]. Neben geringen Kosten sprechen die

Recyclingfähigkeit und eine positive CO₂-Bilanz für diese Werkstoffe. Die Natur bietet dabei eine Vielzahl unterschiedlicher Quellen (vgl. Tabelle 2.2).

Blast	Leaf	Seed	Fruit	Stalk	Wood Fibers
Flax	Sisal	Cotton	Coconut	Bamboo	Hardwood
Hemp	Manila	Kapok	Coir	Wheat	Softwood
Jute	Curaua			Rice	
Kenaf	Banana			Grass	
Ramie	Palm			Barley	
Banana				Corn	
Rattan					

Tabelle 2.2: Naturfasern für den Automobilbau [HOLBERY06, S. 82]

Heutzutage werden diese vorwiegend als Dämm- und Trägermaterial in nicht einsehbaren Bereichen eingesetzt. Strikte gesetzliche Auflagen hinsichtlich der Recyclingfähigkeit von zukünftigen Produkten deuten jedoch auf neue Einsatzbereiche hin. Herausforderungen hinsichtlich weiterer Einsatzmöglichkeiten, insbesondere in Sichtbereichen, sind die Homogenisierung der Fasereigenschaften, die Haftung zwischen Faser und Matrix und die Feuchtigkeitsaufnahme [HOLBERY06, S. 80].

War die Anzahl der in der Automobilbranche eingesetzten Materialien für eine lange Zeit sehr überschaubar und konzentrierte sich auf einige wenige Metalle und Kunststoffe, so zeichnet sich während der letzten 20 Jahre eine deutliche Zunahme neuer Materialien mit spezifischen Eigenschaften ab [FRIEDRICH13, S. 15]. Für die Verbindungstechnik und damit auch für die Produktentwickler bedeutet dies neue Herausforderungen, da bekannte und für heutige Materialien bewährte Verbindungen sich oftmals nicht auf die neuen Materialpaarungen übertragen lassen oder erhebliche Mehraufwendungen verursachen.

Trend bei der Entwicklung von Verbindungen

Die Treiber für die Weiterentwicklung der Verbindungstechnik decken sich weitestgehend mit den Treibern für die Einführung neuer Materialien. Es lassen sich bei der Weiter- und Neuentwicklung von Verbindungstechnik drei Handlungsfelder abgrenzen:

1. Hybridverbindungen
2. Leichtbauverbindungen
3. Kosteneffiziente Verbindungen

Hybridverbindungen (Verbindungen, bei welchen unterschiedliche Werkstoffe verbunden werden) stehen in engem Zusammenhang mit den beschriebenen neuen Materialien (vgl. Kapitel 2.1.2) und ermöglichen deren Integration beziehungsweise Anbindung an das Produkt. Diesen Verbindungstechniken kommt eine Schlüsselrolle in der Produktentwicklung zu, da neuartige Materialien nur dann eingesetzt werden können, wenn diese auch effizient in die Produktarchitektur eingebunden werden können.

Bei Leichtbauverbindungen (Verbindungen, bei welchen Leichtbaumaterialien wie Aluminium und CFK zum Einsatz kommen) werden Prozesse weiter- und neuentwickelt, um spezielle Materialpaarungen zu ermöglichen. Die Abnahme der Blechdicke und neue Legierungen stellen immer wieder neue Anforderungen für die Verbindungstechnik dar. Diesen wird beispielsweise durch geregelte Schweißprozesse, den zusätzlichen Einsatz von Strukturklebstoffen und durch neue Verbindungselemente entsprochen.

Stehen bei Hybrid- und Leichtbauverbindungen mit der Ermöglichung neuer Materialpaarungen primär funktionale Aspekte im Vordergrund, so adressiert das dritte Handlungsfeld die Reduzierung der monetären Aufwendungen. Oftmals werden Alternativen zu bestehenden Verbindungen erarbeitet, welche Vorteile im Hinblick auf Einzelteilkosten oder Fertigungszeit bieten. Insbesondere im Bereich der Schnappverbindungen befinden sich eine Vielzahl interessanter neuer Lösungen in Entwicklung, wie beispielsweise die Aufsteckmutter: Ein zweiteiliges Verbindungselement, welches axial auf einen Grobgewindebolzen gesteckt und dann verrastet wird. Gegenüber einer konventionellen Kunststoffmutter entfällt das Aufdrehen, wodurch der Montageaufwand reduziert wird.

In Tabelle 2.3 werden die relevanten Trends den Verbindungen gegenübergestellt und mögliche Einflüsse aufgezeigt.

	Bauteilgewicht	Bauteilwerkstoff	Verbindungstechnik
Individualisierung	Zunehmendes Gewicht durch mehr Funktionalitäten	Luxusmaterialien, funktionelle Materialien	Hybridverbindungen
Ressourcenknappheit	Abnehmendes Gewicht durch Leichtbau-Maßnahmen	Leichtbaumaterialien, Naturmaterialien, Recyclingmaterialien	Lösbare Verbindungen (Demontage, Recycling)

Tabelle 2.3: Mögliche Auswirkungen der Trends auf die Verbindungen

2.2 Auswahl der Verbindungstechnik

Die Auswahl der Verbindungstechnik findet in der frühen Phase der Produktentwicklung durch die Bauteilkonstrukteure in Zusammenarbeit mit den Fertigungsplanern statt. Grundlage für die Skizzierung des Auswahlprozesses liefert die Beschreibung der beteiligten Personen und deren Rollen im Entscheidungsprozess sowie deren Beziehung zueinander.

Die einzelnen Prozessschritte, von den ersten Konzepten bis zur freigegebenen Verbindung, werden exemplarisch am Soll-Prozess für Schraubverbindungen gezeigt. Bezogen auf die Wissenschaftstheorie stellt dieser Prozess den Verwendungszusammenhang dar, dessen Ergebnis durch die Entwicklung und Bereitstellung einer Unterstützung zu verbessern ist.

2.2.1 Beteiligte Arbeitsbereiche bei der Auswahl von Verbindungen

Der Prozess der Auswahl und Auslegung von Verbindungen in der variantenreichen Serienproduktion weist einen iterativen Charakter auf und wird von vier Arbeitsbereichen bestimmt:

- Package und Design
- Bauteilkonstruktion
- Bauteilplanung
- Qualitätssicherung

Mitarbeiter des Package und Design definieren die Produktarchitektur und Form des Produkts. Werden im Rahmen des Package noch nicht die endgültigen Positionen der einzelnen Bauteile definiert, so werden Zonen beschrieben, in welchen die Bauteile zu

verorten sind. Weiter erfolgt durch das Design die Definition von Anmutungsanforderungen, welche ebenfalls Auswirkungen auf die Verbindungstechnik haben können. Ein Beispiel stellt die Sichtbarkeit von Schraubenköpfen dar. Neben Oberflächen spielen Maße, Toleranzen und Fugen bei der Anmutung eines Produkts eine große Rolle und stellen damit spezifische Anforderungen an die Verbindungstechnik.

Auf Basis der Informationen aus Package und Design spezifizieren Bauteilkonstrukteure die Einzelteile weiter, konstruieren diese und fügen sie zu Baugruppen zusammen. Während dieses Konsolidierungsprozesses findet die Auswahl und Auslegung der Verbindungstechnik statt. Daran beteiligt sind neben den Bauteilkonstrukteuren auch Bauteilplaner, welche Produktionsanforderungen und -wissen in den Konstruktionsprozess einfließen lassen.

Sobald die Bauteile konstruiert und erste Prototypen hergestellt sind, werden diese durch Mitarbeiter der Qualitätssicherung untersucht und geprüft. Dabei werden die Bauteile unter seriennahen Bedingungen verbaut und der Prozess analysiert. Kommt es zu Beschädigungen am Bauteil oder sind die Toleranzen sehr klein, wird die konstruktive Überarbeitung des Bauteils veranlasst. Andernfalls wird die Konstruktion für die Produktion freigegeben. Diese erfolgt bei Großserienprodukten in der Regel in Form einer Fließbandfertigung, bei welcher der Produktionsprozess auf eine Vielzahl von Takten aufgeteilt wird. Diese Arbeitsteilung hat zur Folge, dass die für die Produktion notwendigen Arbeitsschritte im Gegensatz zur Werkstattfertigung nicht an einem Arbeitsplatz ausgeführt werden, sondern auf mehrere Arbeitsplätze verteilt sind. Ein Konstrukteur ist somit nicht für die Prozesse an einem Arbeitsplatz, sondern an einer Vielzahl von Arbeitsplätzen über die ganze Produktionslinie hinweg verantwortlich. Gleichzeitig folgt daraus jedoch auch, dass an einem Arbeitsplatz nicht nur die Arbeitsergebnisse eines Konstrukteurs, sondern von mehreren unterschiedlichen Konstrukteuren umgesetzt werden. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 2.2.2 näher untersucht.

2.2.2 Beziehung zwischen Entwicklung und Produktion

Nach Abschluss der Konstruktion und Planung der Produktionsanlagen beginnt die Produktion der von den in Kapitel 2.2.1 genannten Personengruppen erarbeiteten Produkte. Die Arbeitsschritte zur Herstellung eines Produkts werden dabei so auf die einzelnen Takte verteilt, dass eine möglichst gleichmäßige Auslastung besteht und die Takttausgleichszeit minimiert wird ($\text{Takttausgleichszeit} = \text{Taktzeit} - \text{Fertigungszeit}$). Die Visualisierung der Beziehungen zwischen den Konstrukteuren und den von ihnen

verantworteten Arbeitsergebnissen zeigt dabei eine sehr starke Streuung (vgl. Bild 2.8). Weder ist ein Zusammenhang zwischen einer Konstruktionsabteilung und einem Bandabschnitt, noch zwischen einem Konstrukteur und einem Takt auszumachen. Vielmehr ist ein Konstrukteur für eine Vielzahl von Tätigkeiten über die gesamte Produktion zuständig.

In Bild 2.8 werden die an den Schraubverbindungen eines Mittelklassefahrzeuges beteiligten Entwickler mit ihren Abteilungen und den von ihnen verantworteten Schraubfällen in Beziehung gesetzt.

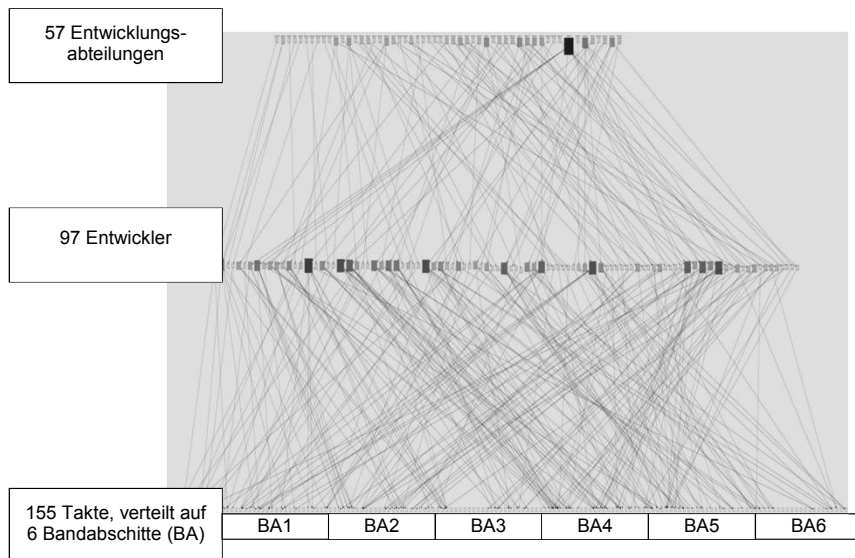


Bild 2.8: Zusammenhang zwischen Entwicklern, Abteilungen und Schraubfällen

- Ein Entwickler verantwortet mehrere Schraubfälle, in bis zu fünf unterschiedlichen Bandabschnitten.
- Die Schraubfälle innerhalb eines Bandabschnitts werden von unterschiedlichen Entwicklern aus unterschiedlichen Entwicklungsabteilungen verantwortet.

Die Detailanalyse verdeutlicht die komplexe Beziehung zwischen Produktion und Entwicklung und damit die Herausforderung, die Auswahl der Verbindungstechnik ganzheitlich und standardisiert vorzunehmen.

2.2.3 Prozess zur Auswahl von Schraubverbindungen

Im Rahmen der Analyse der Prozesse zur Auswahl von Schraubverbindungen wird die gesamte Prozesskette, beginnend mit der Entwicklung, über die Planung bis hin zur Produktion eingehend untersucht. Die beteiligten Disziplinen finden sich in Kapitel 2.2.1 und wurden in Kapitel 2.2.2 in Beziehung zueinander gesetzt. Darauf basierend erfolgt die Bestimmung der einzelnen Schritte zur Auswahl und Auslegung von Verbindungen im Produktentwicklungsprozess.

Grundlage hierfür ist die Analyse eines aktuellen Fahrzeugprojekts. Entwickler und Fertigungsplaner wurden mithilfe von Fragebögen interviewt, der Entwicklungs- und Planungsprozess aufgezeichnet und in Verbindung zueinander gesetzt.

Im ersten Schritt wurden zehn Konstrukteure repräsentativ aus den beteiligten Entwicklungsabteilungen ausgewählt und befragt. Die sich daraus ermittelten Tätigkeiten lassen sich wie folgt gliedern:

- Konzeptentwicklung
- Bestimmung des Befestigungsorts
- Auslegung der Verbindung
- Absicherung der Verbindung

Ein festgelegter Prozess für diese Tätigkeiten existiert nicht, weswegen sich Zeitpunkt und Vorgehensweise der Durchführung der einzelnen Prozessschritte zwischen unterschiedlichen Konstrukteuren unterscheiden. Aufgrund der Tatsache, dass keine festen Termine zum Abschluss der einzelnen Tätigkeiten existieren, wurden Zeiträume beschrieben, in welchen diese Arbeitsschritte ausgeführt wurden. Diese lassen sich einem standardisierten Produktentwicklungsprozess zuordnen (vgl. Bild 2.9).

Während der Beginn der Konzeptphase deutlich variiert, lässt sich feststellen, dass der Abschluss der Auswahlphase bei nahezu allen befragten Konstrukteuren an die Beschaffungsfreigabe der Bauteile gekoppelt ist. Die individuell ermittelten Prozesse zur Beschreibung der Montageverbindungen wurden gegenübergestellt und zu einem Ist-Prozess verdichtet (vgl. Bild 2.9). Die Validierung dieses verdichteten Prozesses erfolgte mittels der Diskussion der Abweichungen mit den betreffenden Entwicklern.

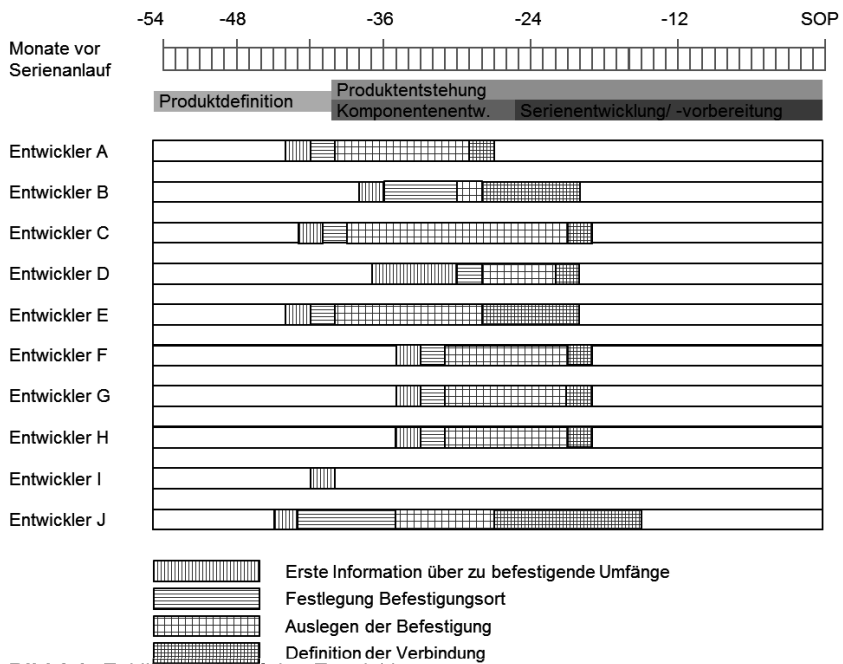


Bild 2.9: Zeitlicher Ablauf des Entwicklungsprozesses

Dazu wurde jede Abweichung identifiziert und der Grund ermittelt. Die Ursachen der Abweichungen lassen sich in folgende Kategorien zusammenfassen:

1. Information von Vorgängerprojekt bestehen
2. Übernahmeteil aus anderem Fahrzeugprojekt
3. Information aus vorgeschaltetem Prozess nicht verfügbar
4. Priorisierung einer anderen Arbeitsaufgabe

2.2.4 Bewertung der Auswahl der Verbindungstechnik

Die Untersuchung des derzeitigen Auswahlprozesses und der Festlegung der Verbindungstechnik in einem aktuellen Fahrzeugprojekt verdeutlicht die auftretenden Herausforderungen. Neben der großen Anzahl der zu berücksichtigenden Verbindungstechniken erfordert die Vielzahl der beteiligten Arbeitsgebiete die Beachtung teilweise unterschiedlicher Zielsetzungen. Die Beziehung zwischen Entwicklern, Entwicklungsabteilungen und den Produktionsabschnitten ist aufgrund der Arbeitsteilung sehr vielschichtig, wodurch die Absprache zwischen den für die an einem Arbeitsplatz in der Produktion durchzuführenden Tätigkeiten verantwortlichen Konstrukteuren kaum möglich ist.

Ohne definierte Prozesse zur Auswahl der Verbindung hängt die zeitliche Abfolge der Tätigkeiten von den einzelnen Konstrukteuren ab und weist eine große zeitliche Streuung auf. Beeinflussende Faktoren dabei sind die Priorisierung des Projekts sowie die Verfügbarkeit von Informationen zu Vorgängerprojekten und Übernahmeteilen aus anderen Fahrzeugprojekten.

Damit wird neben der Herausforderung bei der Auswahl der Verbindungstechnik aufgrund der großen Menge der zu berücksichtigenden Informationen, die Notwendigkeit der Unterstützung des Konstrukteurs bei dem Auswahlprozess deutlich. Die Vielzahl der beteiligten Personen und deren komplexen Beziehungen zueinander bedingten festgelegte Prozesse und methodische Unterstützung, um die optimale Auswahl in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der Produktion sicherzustellen.

2.3 Unterstützung der Auswahl und Auslegung der Verbindung

Bei der Auswahl und Auslegung von Montageverbindungen kommen bei dem untersuchten Fahrzeughersteller derzeit zwei unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz: Ein Katalog mit verbindlich definierten Standards sowie ein Softwaretool zur Kostenbewertung von Montageverbindungen.

2.3.1 Bestehende Werkzeuge zur Unterstützung der Auswahl von Verbindungen

Der existierende Standardisierungskatalog umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Bauteile, für die unternehmensübergreifend gültige Lösungen beschrieben wurden. Enthalten sind neben der Verbindungstechnik auch zu verwendende Verbindungselemente und Montageprozessgrößen.

Das genutzte Softwaretool ermöglicht die Spezifikation des Werkstoffs der Fügepartner sowie die Festlegung von funktionalen Anforderungen an die Verbindung wie Waserdichtheit, Lösbarkeit und Positioniergenauigkeit. Ergebnis ist eine Übersicht der technisch möglichen Verbindungstechniken und deren monetäre Bewertung.

2.3.2 Bewertung der bestehenden Werkzeuge zur Unterstützung der Auswahl und Auslegung von Montageverbindungen

Die vorhandenen Werkzeuge bieten eine Unterstützung im Konstruktionsprozess und können als Hilfestellung bei der Auswahl der Montageverbindung dienen. Dabei lässt sich der Standardisierungskatalog dem fallbasierten Schließen zuordnen. Für ein Problem wird in einer Datensammlung nach ähnlichen Problemstellungen gesucht und deren Lösung auf die aktuelle Fragestellung übertragen. Die Problemcharakterisierung erfolgt dabei jedoch nicht über geometrische oder funktionale Attribute, sondern über die Bezeichnung des zu verbindenden Bauteils. Diese Vorgehensweise birgt einerseits die Gefahr, dass für ein zu lösendes Problem aufgrund identischer Bauteilbezeichnung eine bestehende Lösung herangezogen wird, obwohl sich die Charakteristika der Fügepartner geändert haben. Andererseits kann die Vorgehensweise dazu führen, dass für ein bekanntes Problem eine neue Lösung entwickelt wird, da sich die Bezeichnung des zu verbindenden Bauteils geändert hat.

Beispiel hierfür ist die Befestigung eines Airbag-Sensors an ein Karosseriebauteil. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, halten immer mehr neue Materialien Einzug in den Automobilbau. So werden heute große Teile der Karosserie aus höher- und höchstfesten Stählen hergestellt, bei denen Löcher und Nuten nicht mehr wie bei konventionellen Stählen im Umformprozess eingebracht werden können, sondern einen zusätzlichen Prozessschritt erfordern. Die Übertragung der bislang günstigsten Verbindungstechnik – Schnappverbindung in Loch – führt zu einem zusätzlichen Prozessschritt und damit zu Mehrkosten. Daher ist die Überprüfung der Kompatibilität der in den Standards beschriebenen Lösungen mit den konkreten Gegebenheiten unbedingt notwendig.

Das bestehende Softwaretool berücksichtigt den Werkstoff der zu verbindenden Bauteile, was in dem beschriebenen Fall zu deutlich besseren Ergebnissen führt. Die Massen und damit die auftretenden Kräfte werden jedoch nicht betrachtet. Damit fehlt die wichtigste Eingangsgröße für die Auswahl und Auslegung der Verbindungstechnik, und die Ergebnisse bieten großen Interpretationsspielraum.

Das beschriebene Defizit des zu geringen Detaillierungsgrads der Alternativen für eine wirtschaftliche Bewertung bestätigt sich in der Praxis ebenfalls.

3 Grundlagen und Stand der Technik

Ergänzend zu den Beobachtungen aus der Praxis (vgl. Kapitel 2) sind die Grundlagen und der Stand der Technik in der Literatur zu untersuchen. Entsprechend der Forschungsfragen (vgl. Kapitel 1.4) werden dabei drei Themenfelder behandelt:

Forschungsfrage 1: Wie lässt sich eine Verbindung zwischen zwei Bauteilen beschreiben, sodass daraus alle im Lösungsraum existenten Alternativen abgeleitet werden können?

Untersucht werden vorliegende Beschreibungen von Produkten und Prozessen mit dem Fokus auf deren Eignung zur Ableitung unterschiedlicher Lösungen (vgl. Kapitel 3.1). Neben technisch orientierten Beschreibungen, wie die integrierten Produkt- und Prozessmodelle von Munoz, Groll und des SFB 361, wird mit der Systemtheorie ein allgemeiner Ansatz zur Beschreibung von technischen Systemen zugrunde gelegt.

Forschungsfrage 2: Wie lassen sich alle im Lösungsraum enthaltenen Verbindungen ermitteln und bewerten?

Betrachtet werden bekannte Methoden zur Auswahl von Verbindungsarten in der frühen Phase der Produktentwicklung (vgl. Kapitel 3.2). Methoden des Wissensmanagements liefern die Grundlage und dienen als Ordnungsschema. Dieses Ordnungsschema nutzend, werden Methoden zur Auswahl von Prozessen und Materialien mit besonderem Fokus auf Verbindungen untersucht und eingeordnet.

Forschungsfrage 3: Kann die entwickelte Methodik den Konstruktionsprozess von Verbindungen vereinfachen sowie reproduzierbar machen und dabei die Auswahl und Auslegung der Verbindungen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit verbessern?

Zur Vereinfachung und Verbesserung des Konstruktionsprozesses bedarf es der Interaktion der am Prozess beteiligten Personen. Daher sind Methoden und Techniken der Informationsbereitstellung und der Evaluierung der Informationsübertragung zu untersuchen (vgl. Kapitel 3.2).

3.1 Produkt- und Prozessdokumentation

Bei der Beschreibung von Produkten, die aus mehr als einem Bauteil bestehen, sind zwei Sichtweisen zu unterscheiden: Die Dokumentation der zu verbindenden Bauteile und die des Produktionsprozesses.

Pahl [PAHL05, S. 194] beschreiben die Dokumentation der zu verbindenden Bauteile in Stücklisten als zentrale Tätigkeit des Ausarbeitens. Das Ausarbeiten zielt auf die herstellungstechnische Festlegung der Lösung ab, einschließlich der Zusammenstellung von Nutzungsangaben (Produktdokumentation). Die Stückliste wird, abhängig von Branche und Fertigungsart (Einzel-, Klein-, Großserienfertigung), um weitere Informationen wie Montagevorschriften ergänzt [PAHL05, S. 551]. Während Fertigungsart und -reihenfolge bei einer Werkstattfertigung der Erfahrung und Kenntnis der Fertigungsmitarbeiter überlassen werden, bedingt die Großserienfertigung eine detaillierten Definition von Arbeitsfolgen, um einen einheitlichen, reproduzierbaren Produktionsprozess zu gewährleisten.

Kennzeichnet die Prozessdokumentation auf Bauteilebene die Fertigungsschritte, die zur Herstellung des Einzelteils notwendig sind, so werden auf der Ebene des Zusammenbaus die Montageschritte beschrieben, die zur Verbindung der einzelnen Bauteile zum Endprodukt notwendig sind. Diese erfolgt entweder bereits während der Konstruktion oder anschließend durch eigens dafür ausgebildete Arbeitsplaner. Ergebnis der Prozessdokumentation ist ein Arbeitsplan, der die notwendigen Arbeitsfolgen, versehen mit Abhängigkeiten und Vorgangszeiten, enthält [EVERSHEIM02, S. 25].

Sowohl der Bereich der Produktdokumentation als auch die Prozessdokumentation ist bereits ausführlich in der einschlägigen Fachliteratur beschrieben, weshalb an dieser Stelle auf diese Untersuchungen verwiesen sei (vgl. [PAHL05]; [LINDEMANN06]; [EVERSHEIM02]). Den Anforderungen der variantenreichen Serienfertigung nach einer umfangreichen Berücksichtigung von Prozessanforderungen im Entwicklungsprozess entsprechend, werden im Folgenden Ansätze untersucht, bei denen Produkt- und Prozessdokumentation zusammengeführt werden. Kriterien bei der Untersuchung sind die Detailtiefe, die hierarchische Struktur, die umfassende Berücksichtigung der Prozessinformationen sowie die Voraussetzung für eine rechnergestützte Verarbeitung der Daten.

3.1.1 Modelle zur integrierten Produkt- und Prozessbeschreibung

Stellvertretend für die in der Literatur bekannten Modelle zur integrierten Produkt- und Prozessdokumentation werden die Ansätze von Munoz, Groll und des SFB 361 analysiert. Diesen Ansätzen ist gemein, dass sie in jüngster Vergangenheit in enger Kooperation mit Unternehmen der variantenreichen Serienfertigung ([TOLEDO MUÑOZ06]: Volkswagen AG; [GROLL08]: Daimler AG) entstanden sind und damit die aktuellen Anforderungen dieser umfänglich wiedergeben.

Toledo Muñoz

Munoz untersucht Verbindungen zwischen den Bauteilen von Fahrzeugen und entwickelt eine Methodik, die unter Einsatz von Agenten die Modellierung und Analyse der Verbindungen im Produktentstehungsprozess ermöglicht. Für die Beherrschbarkeit der Komplexität des Gesamtsystems Fahrzeug stellt die abstrakte, systemunabhängige Fahrzeugteilbeschreibung die notwendige Grundlage dar. Dazu wird das PLUG-Modell entwickelt [TOLEDO MUÑOZ06, S. 36].

Das PLUG-Modell besteht aus einem Struktur- und einem Funktionsmodell: Das Strukturmodell beschreibt die Elemente der Verbindung sowie deren Eigenschaften [TOLEDO MUÑOZ06, S. 35], während das Funktionsmodell der Überprüfung potenzieller Verbindungen zwischen zwei Teilen dient, Vorschläge zu möglichen Verbindungspartnern macht und bei fehlerhaften Verbindungen Hinweise zu Korrekturmöglichkeiten erteilt [TOLEDO MUÑOZ06, S. 35]. Bezugnehmend auf den Untersuchungsgegenstand der Produkt- und Prozessdokumentation (vgl. Kapitel 3.1) wird im Folgenden der Fokus auf das Strukturmodell gelegt. Weitere Informationen zu dem Funktionsmodell finden sich in [TOLEDO MUÑOZ06]. Bei der Klassifizierung der Fahrzeugteile werden drei Arten von Elementen unterschieden (vgl. Tabelle 3.1):

	Funktion	Ausprägung
Bauteil (BT)	Realisiert die angestrebten Funktionen des Produkts.	Ein BT kann sich aus mehreren Fahrzeugteilen zusammensetzen und bildet dann eine Baugruppe.
Verbindungsteil (VT)	Stellt die Verbindung zwischen Bauteilen her.	Ein Verbindungsteil findet Anwendung, wenn keine unmittelbare Verbindung von Bauteilen möglich ist oder die Flexibilität bei der Montage von Varianten erhöht werden soll.
Verbindungselement (VE)	Dient der Realisierung der Verbindungen zwischen Teilen (BT und VE).	Ein Verbindungselement beschreiben in der Regel ein Norm- oder Wiederholteil.

Tabelle 3.1: Elemente im PLUG-Strukturmodell [TOLEDO MUÑOZ06, S. 38]

Die Teile t eines Produkts T werden dabei vollständig durch die Teilmengen BT , VT und VE beschrieben (vgl. Tabelle 3.1). Die Unterscheidung zwischen Bauteil und Verbindungsteil erfolgt nicht hinsichtlich geometrischer Eigenschaften, sondern hinsichtlich des Kriteriums der Funktion und ist daher anhand von Expertenwissen zu treffen [TOLEDO MUÑOZ06, S. 38] (Hinweis des Verfassers: In der Literatur wird die Ebene der Bauteile (Komponenten) und Baugruppen klar unterschieden [PAHL05, S. 657]).

$$T = \{t_1, \dots, t_n\} \text{ mit } n = \text{Anzahl der Fahrzeugteile} \quad (3.1)$$

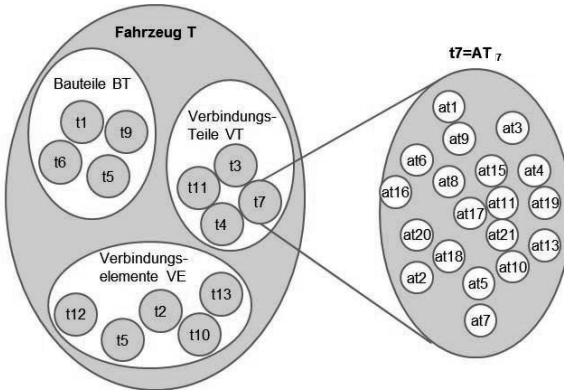
$$T = BT \cup VT \cup VE \quad (3.2)$$

Die Eigenschaften der Teile werden durch Attribute (PLUG-Attribute AT) beschrieben [TOLEDO MUÑOZ06, S. 38 f.].

$$t = AT_t = \{at_1, \dots, at_\lambda\} \text{ mit } \lambda = \text{Anzahl der Teileattribute von Teil } t \quad (3.3)$$

Dabei werden fünf elementare Attribute (P (Punkt), N (Normalenvektor), W (Charakteristische Werte), POS (Position) und NG (Nichtgeometrische Attribute)) sowie vier zusammengesetzte Attribute (POL (Polygone), E (Ebenen), S (Surfaces) und D (Drills)) unterschieden (vgl. Bild 3.1) [TOLEDO MUÑOZ06, S. 40].

$$AT = P \cup N \cup POS \cup W \cup NG \quad (3.4)$$



Darstellung eines Fahrzeugs als Menge T von Teilen t mit deren Teilmengen BT, VT und VE (links) und Beschreibung der Teile t durch eine Menge von Attributen AT (rechts)

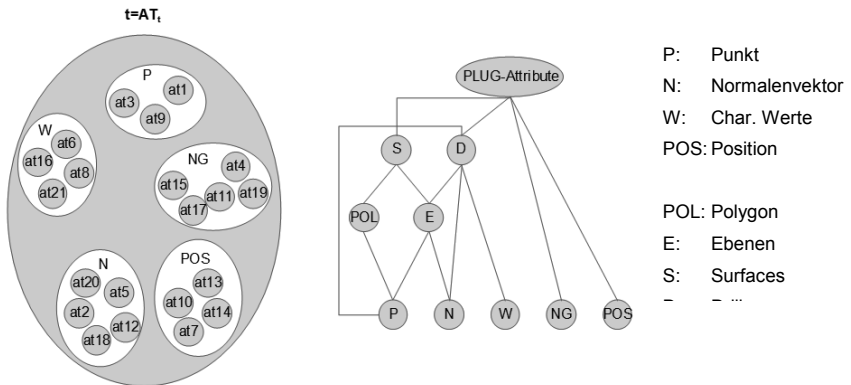


Bild 3.1: Aufbau des PLUG-Strukturmodells und der PLUG-Attribute [TOLEDO MUÑOZ06, S. 38 f.]

Mithilfe der elementaren und zusammengesetzten Attribute lassen sich die Teile vollständig beschreiben. Zur Definition der Verbindung zwischen mehreren Teilen werden Relationen zwischen den Attributen der Verbindungspartner beschrieben. Aus den Relationen zwischen den Attributen lassen sich mittels der Mengentheorie die Verbindungsanforderungen ermitteln [TOLEDO MUÑOZ06, S. 43].

Die Relation R_{AT} lässt sich allgemein für jedes Attributpaar (at_{t_1}, at_{t_2}) zwischen zwei Teilen t_1 und t_2 definieren. Mittels der Beschreibung von ε als die maximale

Abweichung zwischen zwei Attributen lassen sich Toleranzen und Approximationen im PLUG-Modell beschreiben [TOLEDO MUÑOZ06, S. 44].

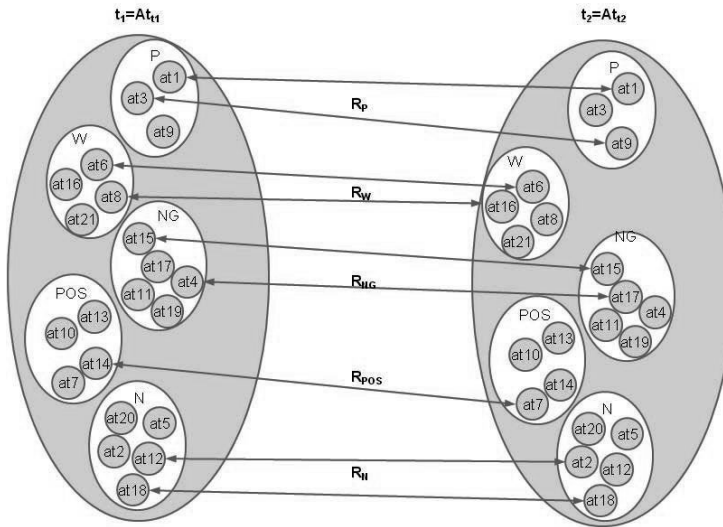


Bild 3.2: Relationen zwischen den Attributen der Verbindungspartner im PLUG-Strukturmodell .

Das von Munoz entwickelte PLUG-Strukturmodell ermöglicht die abstrakte und systemunabhängige Beschreibung der Teile, Verbindungen und Anforderungen an die Verbindung (Munoz beschreibt die Anwendung des Ansatzes an der Verbindungsüberprüfung eines Getriebelagers [TOLEDO MUÑOZ06, S. 92 ff.]). Die Unterscheidung in *BT*, *VT* und *VE* liefert die Grundlage für eine strukturierte Beschreibung. Damit ist die Voraussetzung für weitere (rechnergestützte) Analyseschritte geschaffen. Dazu werden die Attribute der zu verbindenden Bauteile auf Verträglichkeit geprüft.

Groll

Groll beschreibt mit der *Interconnection Documentation* ein integriertes Produkt- und Prozessdatenmodell, das auf der Annahme basiert, dass ein Produkt zusätzlich aus *Interconnections* (verbindende Teile) aufgebaut ist. Damit ist das Produkt mehr als die Summe seiner Bauteile: Es ist die Summe seiner Bauteile und der *Interconnections*. Nach dieser Annahme werden Produkte als Netz aus Bauteilen und *Interconnections* zwischen diesen beschrieben. Die *Interconnections* befinden sich auf gleicher Ebene

wie die Bauteile, vervollständigen die Produktstruktur und können prozessspezifische Informationen enthalten [GROLL08, S. 77] (vgl. Bild 3.3).

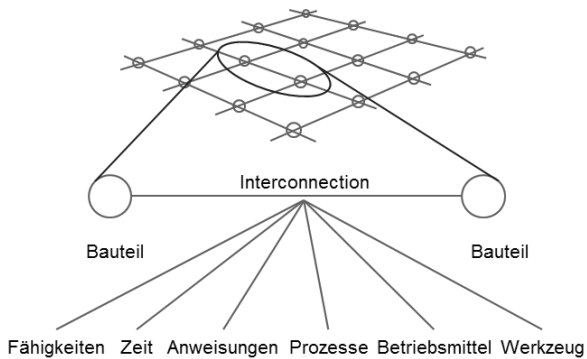


Bild 3.3: Produkte als Netz aus Bauteilen und Interconnections [GROLL08, S. 78]

Dieses Netz entsteht schrittweise durch die Aufspaltung des Produkts. Beginnend mit der Produktbeschreibung werden dem Netz durch jeden Gliederungsprozess neue Details hinzugefügt. Mit steigender Komplexität des Netzes nimmt damit die Zahl der Knoten zu, die Bauteile und Komponenten repräsentieren. Die dem Netz zugrunde liegende Struktur lässt sich an das Produkt und die Produktion anpassen. Für die variantenreiche Serienproduktion liefern eine übergeordnete Produktstruktur (*OPS – overall product structure*) und eine projektspezifische Produktstruktur (*psPS – project specific product structure*) Transparenz und die Möglichkeit, verschiedene Produkte miteinander zu vergleichen [GROLL08, S. 78].

Die von den variantenreichen Produkten in die einzelnen Geschäftsprozesse induzierte Komplexität entsteht auf der untersten Ebene der Produktbeschreibung durch das Hinzufügen oder Austauschen von Bauteilen [GROLL08, S. 79], wie beispielsweise Außenspiegel mit unterschiedlichen Farben und Formen. Zur Abbildung dieses Zusammenhangs werden part positions (PP) eingeführt, die die einzelnen Ausprägungen, die part position variants (PPV), vereinen [GROLL08, S. 79]. Eine PP ist dabei an einer bestimmten Stelle des Produkts verankert, bündelt 1 bis n alternative PPV und wird zur geometrischen Beschreibung des Verbauorts verwendet [GROLL08, S. 87]. PPV hingegen sind sich gegenseitig ausschließende Varianten einer PP, sind immer

genau einer PP zugeordnet und lassen sich regelbasiert aus dieser ableiten [GROLL08, S. 87]. Sie werden zur Speicherung der Konstruktions- und Beschaffungsinformationen wie Geometrie, Zulieferer, Teilepreis und Bestand genutzt [GROLL08, S. 79]. Fertigungsinformationen sowie logische und physische Beziehungen zwischen den Bauteilen werden in den, in der interconnection position (IP) enthaltenen, interconnection position variants (IPV) abgelegt. Diese sich gegenseitig ausschließenden Alternativen sind genau einer IP zugeordnet und lassen sich regelbasiert ableiten [GROLL08, S. 89]. Damit bieten sie die Voraussetzung für die horizontale Integration von Produkt- und Prozessinformationen.

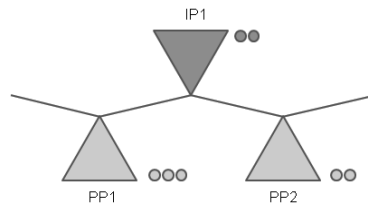


Bild 3.4: Verbindung zwischen interconnection und part position [GROLL08, S. 88]

In einem weiteren Detaillierungsschritt werden der IP weitere PP Objekte und deren Varianten PPV zugeordnet. Dies sind:

- *Procedure position und procedure variant* (Ablaufort und -variante)
- *Tooling position und tooling variant* (Werkzeugort und -variante)
- *Factory position und factory variant* (Produktionsort und -variante)

Der Ablaufort ordnet der IP alternative Abläufe zur Realisierung zu. Eine Ablaufvariante wird durch eine Serie von Aktivitäten beschrieben, die in einer Abhängigkeit mit dem Ablaufort stehen. Mittels hinterlegter Regeln werden für jede Bauteilvariante die Ablaufvarianten ausgewählt. Der Werkzeugort beschreibt die alternativen Werkzeuge zur Realisierung einer *Interconnection*. Eine Werkzeugvariante repräsentiert den Werkzeugort mittels spezifischer Werte und wird durch hinterlegte Regeln der Bauteilvariante zugeordnet. Der Produktionsort (z. B. Montagelinie oder Takt) beschreibt die alternativen Produktionsvarianten zur Realisierung einer *Interconnection*. Eine Produktionsvariante repräsentiert den Produktionsort mittels spezifischer Werte und wird durch hinterlegte Regeln der Bauteilvariante zugeordnet [GROLL08, S. 113 ff.].

Werden die *Interconnections* durch die Zuweisung einer Nummer (*connection number*) in zeitliche Abhängigkeit zueinander gesetzt, lassen sich diese in eine Reihenfolge bringen. Kriterium für die Vergabe der Nummer ist die Verbaureihenfolge (Vorgänger; Nachfolger). Bei der Vergabe der Nummern an zwei *Interconnections* wird unterschieden, ob die zur Realisierung notwendigen Tätigkeiten gleichzeitig ausgeführt werden können (gleiche Nummer) oder nacheinander auszuführen sind (Vorgänger: n ; Nachfolger: $n + 1$). Mittels Referenzierungen lassen sich die *Interconnections* in einen Vorranggraph überführen [GROLL08, S. 101], welcher Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen nutzend die technische Verbaureihenfolge des Produkts widerspiegelt. Der Vorranggraph lässt sich unter Verwendung von Produktionsort und -variante der beinhalteten *Interconnections* abschließend zum Fertigungsplan weiterentwickeln [GROLL08, S. 100 f.].

Groll [GROLL08] stellt mit der auf *Interconnections* basierenden integrierten Produkt- und Prozessdokumentation ein hierarchisches Modell zur Verfügung, welches neben der Vereinigung von Produkt- und Prozessdaten einen Beitrag zur Reduzierung der Komplexität in der Produkt- und Prozessdokumentation liefert.

Integriertes Produkt- und Prozessdatenmodells (IPPM)

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 361 wurden zwischen 1994 und 2002 an der RWTH Aachen "Modelle und Methoden zur integrierten Produkt- und Prozessgestaltung" entwickelt. Neben Organisation und Informationsmanagement, integrierter Produktdefinition und Technologieplanung sowie integrierter Produkt- und Produktionsprozessgestaltung wurde ein Integriertes Produkt- und Prozessdatenmodell (IPPM) beschrieben [EVERSHEIM05a, S. 3].

Das IPPM umfasst 36 logische Informationseinheiten (Schemata), welche sich in sechs Informationskategorien einordnen lassen (vgl. Bild 3.5).

<ul style="list-style-type: none"> ■ Methoden_Schema 		Referenzmodell	
Produktdatenmodell <ul style="list-style-type: none"> ■ Anforderung_Schema ■ Effekt_Schema ■ Effektraeger_Schema ■ Definition_Skizzierelement_Schema ■ Skizzen_Schema ■ Prinzip_Schema ■ Funktions_Schema ■ Gestalt_Schema ■ Form_Feature_Schema ■ Produktstruktur_Schema ■ Planungs_Schema ■ Vorgang_Schema 		Metainformationsmodell <ul style="list-style-type: none"> ■ Informations_Schema ■ Meta_Information_Schema ■ Ereignis_Schema ■ Workflow_Schema 	
		Gleichungsdatenmodell <ul style="list-style-type: none"> ■ Gleichung_Schema ■ Parameter_Schema ■ Parameter_Unsicherheits_Schema 	
<ul style="list-style-type: none"> ■ Ressourcen_Schema ■ Merkmal_Schema ■ Werkstoff_Schema ■ Betriebsmittel_Schema 		Ressourcendatenmodell <ul style="list-style-type: none"> ■ Organisations_Schema ■ Personal_Schema ■ Kommunikationsart_Schema ■ Zeit_Schema 	
		Lebenszyklusdatenmodell <ul style="list-style-type: none"> ■ Lebenszyklus_Schema 	
<ul style="list-style-type: none"> ■ Bewertungs_Schema ■ Konstruktions_Argument_Schema ■ Leistungs_Schema 		Bewertungsdatenmodell <ul style="list-style-type: none"> ■ Ziel_Schema ■ Komplexitäts_Schema ■ Kosten_Schema 	

Bild 3.5: Struktur des integrierten Produkt- und Prozessdatenmodells (IPPM) [BRE-_n CHER05, S. 59]

nisierung des jeweiligen Unternehmens [BRECHER05, S. 58]. Für eine Entwicklungsaufgabe wird ein generisches *Prozess_Schema* entwickelt und implementiert, das die Grundlage für die Modellierung der prozessrelevanten Informationen und damit für die Integration des Prozessdatenmodells in das Produktdatenmodell darstellt [BRECHER05, S. 60]. In diesem erlaubt die Informationseinheit „Aktivität“ als zentrales Element den Aufbau von Aktivitätenstrukturen und deren schrittweise Konkretisierung. Der Bezug zu Ressourcen, Produktstruktur sowie Ziel, Zeit, Information und Funktion wird durch Referenzen auf die jeweiligen Schemata abgebildet.

Bei der Integration von Produkt- und Prozessdatenmodell werden drei unterschiedliche Mechanismen unterstützt:

1. Integration auf der generischen Ebene direkt über Referenzen in den Schemata des Datenmodells.
2. Integration auf der Instanzenebene durch die Wiederverwendung bereits integrierter Bausteine aus Produkt und Prozess, ermöglicht durch vom Anwender definierte generische (allgemeingültige) Aktivitäten.
3. Integration zwischen generischer und Instanzenebene mittels Modellierung von Metainformationen in einem eigenen Schema.

Damit wird die Verknüpfung aller Daten, Informationen und deren Änderungen zwischen Prozessdatenmodell und Produktdatenmodell ermöglicht [BRECHER05, S. 62].

3.1.2 Systemtheorie

Die Systemtheorie beschreibt allgemein die Beziehung zwischen den Elementen eines Systems, die Beziehung zwischen Struktur und Funktion von Systemen und die Beziehung zwischen Teilsystemen und Gesamtsystem [WIENDAHL08, S. 7]. Die Allgemeine Systemtheorie ist dabei nicht auf eine bestimmte Disziplin begrenzt, sondern interdisziplinär [ROPOHL09, S. 71].

Grundbegriffe der Systemtheorie

Ehrlenspiel beschreibt das System als eine „Menge von Elementen (Teilsysteme), die Eigenschaften besitzen und durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Die Systemgrenze grenzt das System von seiner Umwelt ab“ [EHRENSPIEL09, S. 19].

Dabei arbeitet die Systemtechnik mit abstrakten Modellen, die nach folgenden Regeln aufgebaut sind:

- „Ein System besteht aus einer Menge von Elementen und einer Menge von Beziehungen (Relationen), die zwischen Elementen herrschen.
- Jedes System kann in Subsysteme niedrigerer Ordnung zerlegt werden. Elemente, die nach einer anderen Beziehung zusammengefasst werden, heißen Teilsysteme.
- Jedes Element, jedes Subsystem und jedes ganze System kann mit einer Systemgrenze abgegrenzt werden und durch Input (Eingang), Output (Ausgang) und die Funktion beschrieben werden (so genannte Black-Box-Darstellung)“ [WIENDAHL08, S. 7].

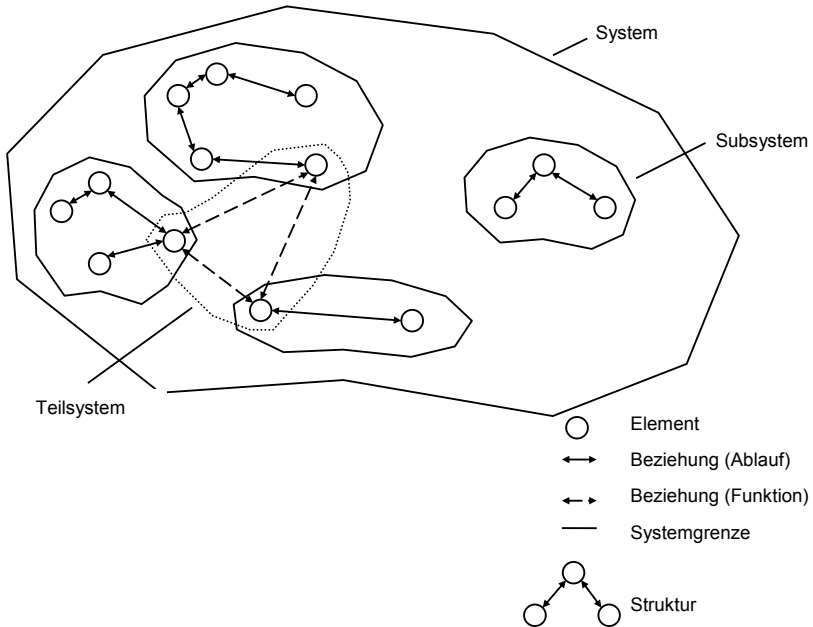


Bild 3.6: Grundbegriffe der Systemtheorie (nach WIENDAHL08, S. 7)

Bild 3.6 veranschaulicht den Aufbau des Systems und seine Bestandteile. Grundsätzlich lassen sich Systeme im Hinblick auf ihre Austauschbeziehungen mit der Umwelt klassifizieren, welche alle Elemente beinhaltet, die außerhalb der Grenze des Systems liegen. So werden Systeme, die Austauschbeziehungen über Systemgrenzen hinweg aufweisen, als offene Systeme bezeichnet. Systeme, die keine solchen Beziehungen aufweisen, werden als geschlossene Systeme klassifiziert.

Systemkonzepte

In der Literatur werden drei grundsätzliche Systemkonzepte unterschieden, die jeweils einen Systemaspekt in den Vordergrund stellen. Dies sind das funktionale, das strukturelle und das hierarchische Systemkonzept [ROPOHL09, S. 75; PATZAK82, S. 65].

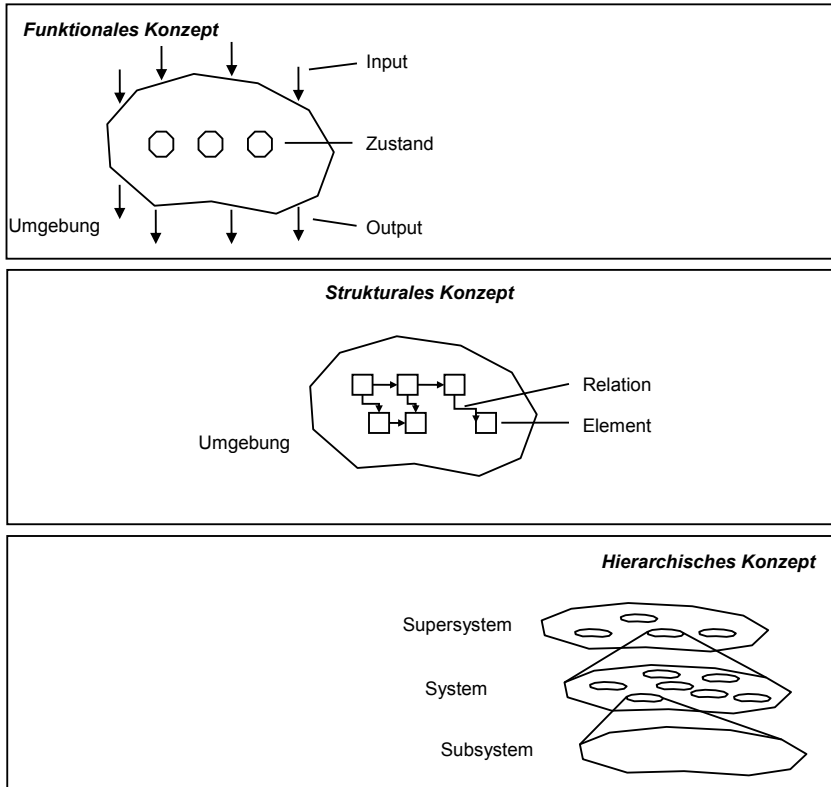


Bild 3.10: Konzepte der Systemtheorie nach Ropohl [ROPOHL09, S. 76]

Das funktionale Konzept stellt das System als eine Blackbox dar und beschreibt, wie Eingangsgrößen (Inputs) in bestimmte Ausgangsgrößen (Outputs) überführt werden [PATZAK82, S. 64]. Dabei sieht das funktionale Systemdenken ausdrücklich von der materiellen Konkretisierung und vom inneren Aufbau des Systems ab und beschränkt sich auf das Verhalten einer Ganzheit in ihrer Umgebung [ROPOHL09, S. 76]. Es behandelt nicht Dinge, sondern Verhaltensweisen und fragt nicht: „What is this thing?“, sondern: „What does it do?“ [ASHBY56, S. 1].

Als Beispiel aus dem alltäglichen Leben kann die Benutzung eines technischen Produktes aus Sicht eines Laien herangezogen werden, der sich keine Gedanken über die Vorgänge im Inneren des Systems macht. Erwartet wird lediglich ein Ergebnis

(Output), das auf Anforderung (Input) – beispielsweise das Betätigen eines Schalters – erzeugt wird.

Das *strukturele Systemkonzept* betrachtet ein System als Ganzheit miteinander verknüpfter Elemente [ROPOHL09, S. 75]. Betrachtungen, die dem strukturalen Ansatz folgen, stellen die Frage, welche Systemeigenschaften durch die verschiedenen Beziehungskonstellationen einer untersuchten Menge hervorgerufen werden können. Weiter, befasst sich der strukturele Ansatz mit der Beschaffenheit der Elemente [ROPOHL09].

Das *hierarchische Konzept* beschreibt zum einen, dass ein System in eine Anzahl von Systemen aufgegliedert werden kann. Zum anderen kann das System als Teil eines übergeordneten Systems gesehen werden. Ropohl [ROPOHL09] benutzt in diesem Zusammenhang die Begriffe *Subsystem* und *Supersystem* (siehe Bild 3.10).

Damit beinhaltet eine umfassende Systembetrachtung mehrere Hierarchieebenen, wobei Folgendes gilt: Bewegt man sich in einer Hierarchie abwärts, so erhält man eine detaillierte Erklärung des Systems, während man, wenn man sich in der Hierarchie aufwärts bewegt, ein tieferes Verständnis seiner Bedeutung gewinnt [MESAROVIĆ70, S. 70].

Anschaulich wird diese hierarchische Analyse beispielsweise bei der Betrachtung eines Verbrennungsmotors. Die hierarchische Aufteilung in Teilsysteme ermöglicht detailliertere Informationen zu erlangen und ein tieferes Verständnis für diese zu entwickeln. So lässt sich der Wandel der Linearbewegung des Kolbens in die Rotationsbewegung der Kurbelwelle erst aus der Betrachtung der Subsysteme erschließen, während erst die Analyse des Gesamtsystems zu einem Verständnis für dieses führt.

Die drei Systemkonzepte sind nicht isoliert zu betrachten und schließen sich keineswegs gegenseitig aus. Erst die Verbindung der drei Systemkonzepte führt für ROPOHL zu einem vollständigen Systemmodell, das er wie folgt definiert:

„Ein System ist das Modell einer Ganzheit, die Beziehungen zwischen Attributen (Inputs, Outputs, Zustände etc.) aufweist, die aus miteinander verknüpften Teilen bzw. Subsystemen besteht und die von ihrer Umgebung bzw. von einem Supersystem abgegrenzt wird.“ [ROPOHL09, S. 77]

3.1.3 Zusammenfassung Produkt- und Prozessdokumentation

Produkt- und Prozessdokumentation sowie die Zusammenführung dieser nimmt insbesondere in der variantenreichen Großserienfertigung eine Schlüsselposition in der

Produktentwicklung ein. Produktdokumentation in Form von Stücklisten, Zeichnungen und CAD-Modellen ist ein intensiv beforschter Bereich mit breiter Basis. Auch die Prozessdokumentation wird seit Beginn der Serienfertigung intensiv untersucht und aktuell insbesondere hinsichtlich der Beherrschbarkeit der Komplexität weiterentwickelt. In der Praxis findet häufig eine Arbeitsteilung zwischen Konstruktion, verantwortlich für die Produktgestaltung, und Arbeitsvorbereitung, verantwortlich für die Prozessgestaltung, statt. Diese Disziplinen werden seit den 1980er Jahren vermehrt in Simultaneous Engineering Teams zusammengeführt, um die Entwicklungszeit durch Parallelarbeit zu reduzieren und die Qualität der Entwicklungsergebnisse sicherzustellen [EVERSHEIM05b, S. 8]. Ist seitens der Organisation die Zusammenführung von Produkt- und Prozessgestaltung bereits weit fortgeschritten, so gibt es systemseitig noch deutliche Unterscheidungen. Gemeinsame Produkt- und Prozessmodelle finden sich vorwiegend in der Literatur. Insbesondere die Konzepte von [TOLEDO MUÑOZ06] und [GROLL08], beide in jüngster Zeit in großen Unternehmen der Automobilindustrie entstanden, verdeutlichen die Aktualität und den Praxisbezug des Themas.

Mit den Arbeiten von [TOLEDO MUÑOZ06; GROLL08] und des SFB 361 [BRECHER05] wurden die für die variantenreiche Serienfertigung relevanten Ansätze beschrieben und im Hinblick auf die in Kapitel 3.1 beschriebenen Kriterien untersucht (vgl. Tabelle 3.2).

Dabei ist festzustellen, dass sich die beschriebenen Modelle für die integrierte Produkt- und Prozessdokumentation eignen, die strukturellen Voraussetzungen für eine automatisierte, rechnergestützte Ableitung des Lösungsraumes jedoch aufgrund des eingeschränkt hierarchischen Aufbaus und begrenzten Detaillierungsgrades nicht gegeben sind. Die Systemtheorie bietet mit ihrem hierarchischen Konzept eine passende Lösung für die Einschränkungen der genannten Systeme und wird daher im Weiteren als Grundlage für die Auswahl der lösbaren Verbindungen verwendet.

Kriterium	Munoz	Groll	SFB361	Systemtheorie
<input type="radio"/> nicht erfüllt				
<input checked="" type="radio"/> bedingt erfüllt	[TOLEDO MUÑOZ06]	[GROLL08]	[BRECHER05]	[ROPOHL09]
<input type="radio"/> erfüllt				

Detailtiefe	●	●	○	●
Hierarchischer Aufbau	○	○	○	●
Abbildung gesamter Produktionsprozess	●	●	●	○
Rechnergestützt verarbeitbar	●	●	●	●

Tabelle 3.2: Bewertung der Ansätze zur integrierten Produkt- und Prozess-dokumentation

3.2 Unterstützung der Prozessauswahl mit Fokus auf Verbindungsprozesse

Die Auswahl von Material und Prozess ist zentraler Bestandteil des Konstruktionsprozesses. Ashby vergleicht die bei konstruktiven Aufgaben zu berücksichtigenden Informationen mit dem Wortschatz eines durchschnittlichen Europäers. Dieser benutzt ca. 5.000 unterschiedliche Wörter, wohingegen Konstrukteure zwischen 40.000 und 80.000 unterschiedliche Materialien und mindestens 1.000 unterschiedliche Arten der Bearbeitung berücksichtigen müssen [ASHBY04, S. 51]. Diese Verhältnisse verdeutlichen die Herausforderung bei der Material- und Prozessauswahl und damit die Notwendigkeit von Systemen zum Informationsmanagement und zur Unterstützung der Auswahl.

Der Bedarf an Material- und Prozessinformationen entwickelt sich über den Produktentwicklungsprozess von unspezifizierten Informationen aller Materialien und Fertigungsprozesse in der frühen Phase zu detaillierten Informationen über wenige Materialien und Fertigungsprozesse am Ende des Entwicklungsprozesses [ASHBY04, S. 52] (vgl. Bild 3.11).

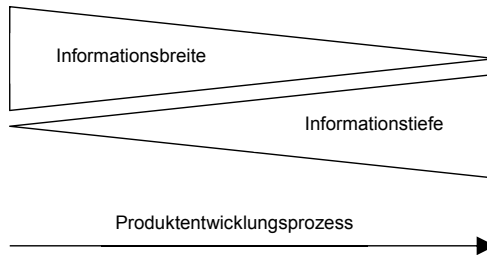


Bild 3.11: Entwicklung der Informationsbreite und -tiefe im Produktentwicklungsprozess

Aufgrund kürzer werdenden Entwicklungszeiten müssen Entwickler sich der Notwendigkeit von effizienter Konstruktionsunterstützung bewusst sein [L'EGLISE01, S. 324]. Für die Auswahl der Verbindungstechnik sind v. a. Schnelligkeit, Verlässlichkeit und Systematik Anforderungen an ein Unterstützungssystem. Dazu haben Unterstützungssysteme einen hohen Interaktionsgrad aufzuweisen, um dem Konstrukteur jederzeit das Gefühl der Entscheidungshoheit zu vermitteln [L'EGLISE01, S. 324].

Giachetti formuliert drei Herausforderungen bei der Auswahl von Material und Fertigungsprozess [GIACHETTI98, S. 265]:

1. Die Auswahl muss in der Konzeptphase erfolgen, die durch qualitative Beschreibung der Anforderungen, unpräzise Daten und unbekannte oder komplexe Beziehungen gekennzeichnet ist. Dies hat zur Folge, dass viele Einflussfaktoren auf die Auswahl von Material und Fertigungsprozess nur abgeschätzt werden können.
2. Unterschiedliche Einflussfaktoren haben unterschiedliche Relevanz für die Auswahl des Materials und der Fertigungsprozesse und sind damit unterschiedlich zu gewichten.
3. Die Anzahl der zu berücksichtigenden Werkstoffe und Fertigungsprozesse übersteigt die Möglichkeiten einer manuellen, intuitiven Vorgehensweise bei weitem. Zu den bekannten mehr als 40.000–80.000 Werkstoffalternativen [ASHBY04, S. 51] kommen ständig und mit zunehmender Geschwindigkeit neue Alternativen hinzu.

Strategien zur Unterstützung des Auswahlprozesses lassen sich allgemein als Transferfunktion beschreiben. Diese überführt eine Menge von Eingangsgrößen, im Falle der Prozessauswahl die Anforderungen der Konstruktion, in eine Menge von Ausgangsgrößen, die Auswahl des Prozesses (vgl. Bild 3.12) [ASHBY04, S. 53].

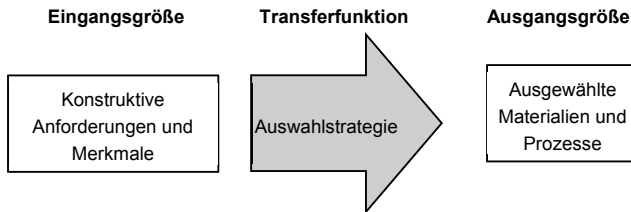


Bild 3.12: Auswahlstrategie: Transferfunktion und Strategien [ASHBY04, S. 55]

Grundsätzlich lassen sich dabei drei Arten von Transferfunktionen unterscheiden: Quantitative Analyse, Fragenkatalog und Vergleich. Diese stellen neben dem Funktionsumfang die Grundlage für den Kriterienkatalog dar und werden in Kapitel 3.2.1 detailliert beschrieben. Das darauf basierende Ordnungsschema wird zur Untersuchung der bestehenden Ansätze verwendet (vgl. Kapitel 3.2.2–3.2.4). Für jede der erörterten Arten von Transferfunktionen wird ein repräsentativer Vertreter näher beschrieben.

3.2.1 Kriterienkatalog für die Analyse der Strategien zur Material- und Prozessauswahl

Aufbauend auf den Beobachtungen aus der Praxis (vgl. Kapitel 2) und den in der Literatur beschriebenen Anforderungen (vgl. Kapitel 3.2) wurde ein Kriterienkatalog zur Analyse der Strategien zur Material- und Prozessauswahl entwickelt (vgl. Tabelle 3.3). Der Kriterienkatalog berücksichtigt die funktionalen Anforderungen der variantenreichen Serienfertigung sowie die zugrundeliegende Methode.

Kriterium	Erläuterung	Beispiel	Wertebereich
Berücksichtigte Verbindungen	Anzahl der berücksichtigten Verbindungen (nach DIN 8593)	Schraubverbindungen, Klebeverbindungen, Nietverbindungen	1 – n n: Anzahl der Verbindungen
Berücksichtigung von Kosten	Ganzheitliche Bestimmung der durch die Verbindung verursachten Kosten und die Möglichkeit, diese als Kriterium für die Auswahl zu nutzen	Fertigungszeit/ -kosten, Logistikkosten, Werkzeugkosten	Ja/Nein
Detaillierungsgrad	Detaillierung der Verbindung zwischen zwei Bauteilen in einzelne Verbindungspunkte	Vier Schrauben M6 in 6kt Schweißmutter	Ja/Nein
Abbildung unterschiedlicher Varianten	Berücksichtigung unterschiedlicher Anbindungsvarianten innerhalb einer Verbindungsart	Vier Schrauben M6 oder sechs Schrauben M5	Ja/Nein
Erweiterbarkeit	Möglichkeit der Integration neuer Verbindungstechniken	Integration von Deltaspot Schweißen zur Realisierung von Alu-Alu Verbindungen	Ja/Nein
Wartungs-/ Erstellungs-aufwand	Aufwand zur Systempflege	Anzahl der zu befragenden Experten	gering/mittel/hoch
Integration externen Wissens	Möglichkeit der Einbindung und des Schutzes von externem Wissen	Web Services zur Kapselung und Verteilung von Wissen	Ja/Nein

Tabelle 3.3: Analysekriterien für die Untersuchung von Auswahlstrategien

Zwischen den im Funktionsumfang beschriebenen Kriterien und der dem Auswahlprozess zugrundeliegende Methode bestehen Interdependenzen, die in der Beschreibung der Methoden näher erläutert werden.

Die Lösungen zur rechnerunterstützten Auswahl von Material und Fertigungsprozess weisen zwei Schwerpunkte auf: Strukturierte Datenbanken sowie Methoden zum multikriteriellen Vergleich von Materialien und Fertigungsprozessen [ASHBY04, S. 51]. Grundlage für jede Suche ist die Formulierung einer Wertfunktion und die Untersuchung des Lösungsraums der möglichen Lösungen unter Nutzung eines

Optimierungsverfahren [ASHBY04, S. 51]. Dabei gliedert sich die Auswahlstrategie in drei Schritte [ASHBY04, S. 53]:

1. Beschreibung der Abhängigkeiten, die erfüllt sein müssen, wenn das Material die Anforderungen erfüllt.
2. Beschreibung einer Wertfunktion, nach welcher bewertet werden kann, ob und wie gut ein Material die Anforderungen erfüllt.
3. Entwicklung einer Suchprozedur zur Untersuchung des Lösungsraums, Identifizierung passender Materialien und Bewertung hinsichtlich der Übereinstimmung mit den formulierten Anforderungen.

Allen Ansätzen (u. a. DIETER86; CHARLES99; FARAG89; LEWIS90), die dieser Logik folgen, ist gemein, dass sie eine Eingangsgröße – die Anforderungen – in eine Ausgangsgröße – die Auswahl von Material und Prozess – überführen (vgl. Bild 3.13). Die Unterstützungssysteme lassen sich dabei entsprechend ihres Aufbaus in Systeme zur freien Suche, fragenbasierten Suche oder der Analogie einordnen [ASHBY04, S. 53].

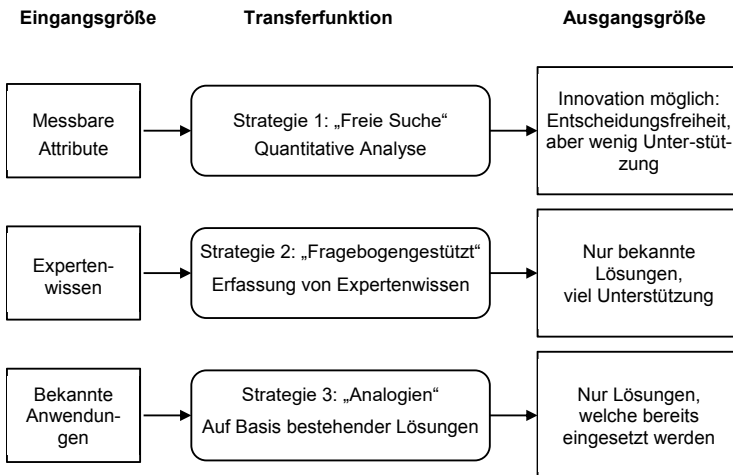


Bild 3.13: Auswahlstrategie als Transferfunktion [ASHBY04, S. 55]

Die auf quantitativer Analyse basierende, freie Suche ermöglicht den größten Freiheitsgrad, ist schnell, effizient und birgt das Potenzial, neue und innovative Lösungen zu generieren. Dazu werden jedoch präzise formulierte Eingangsinformationen benötigt, um diese dann mit Suchmethoden weiterverarbeiten zu können [ASHBY04, S. 53].

Fragenbasierte Ansätze basieren auf der schrittweisen Abfrage von Informationen, auf deren Basis unter der Zuhilfenahme von Expertenwissen mögliche Lösungen identifiziert werden. Eine mögliche Implementierung eines solchen Systems ist ein Entscheidungsbaum. Zwei Ausprägungen dieser Art von Unterstützungssystemen sind die von Delchambre [DELCHAMBRE96] und Maree [MAREE99]. Als Schwächen des Systems sind die geringe Anzahl an möglichen Lösungen sowie der große Aufwand bei der Pflege der Daten anzuführen. Bei jeder neu hinzugefügten Lösung müssen sämtliche bestehenden Expertenregeln untersucht werden [L'EGLISE01, S. 325].

Fallbasierte Ansätze stützen sich auf eine Sammlung von Problembeschreibungen und zugehörigen Problemlösungen. Neue Problemstellungen werden auf Ähnlichkeit mit vergangenen, bekannten Problemen untersucht und bei ausreichender Überschneidung wird die Lösung von dem bekannten, gelösten Problem auf das aktuelle übertragen. Damit werden Erfahrungswerte übertragen, neue Lösungen können jedoch nicht erzeugt werden. Da Innovationspotenziale damit nicht erschlossen werden, sind Assistenzsysteme, welche diesem Ansatz folgen, nur bedingt zeitgemäß [L'EGLISE01, S. 325].

3.2.2 Prozessauswahl mittels freier Suche basierend auf quantitativer Analyse

Die Analyse entsprechend der freien Suche basiert in der Regel auf drei Schritten: die Bestimmung der Funktion, der zu berücksichtigenden Randbedingungen sowie des Ziels der Optimierung (vgl. Bild 3.14).

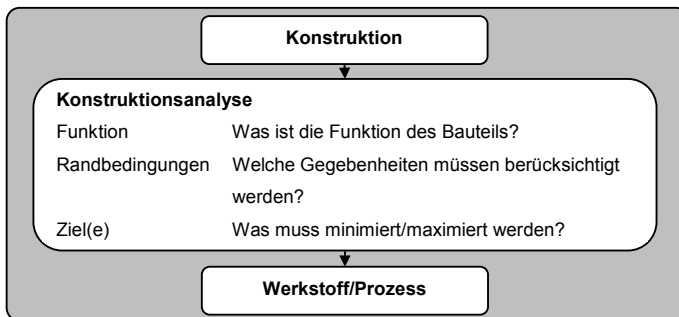


Bild 3.14: Vorgehensweise bei der quantitativen Analyse [ASHBY04, S. 55]

fen und Prozessen mit den Anforderungen an die Konstruktionsaufgabe abgeglichen

(Screening), geordnet (Ranking) und abschließend um Zusatzinformationen ergänzt (Supporting Information) (vgl. Bild 3.15):

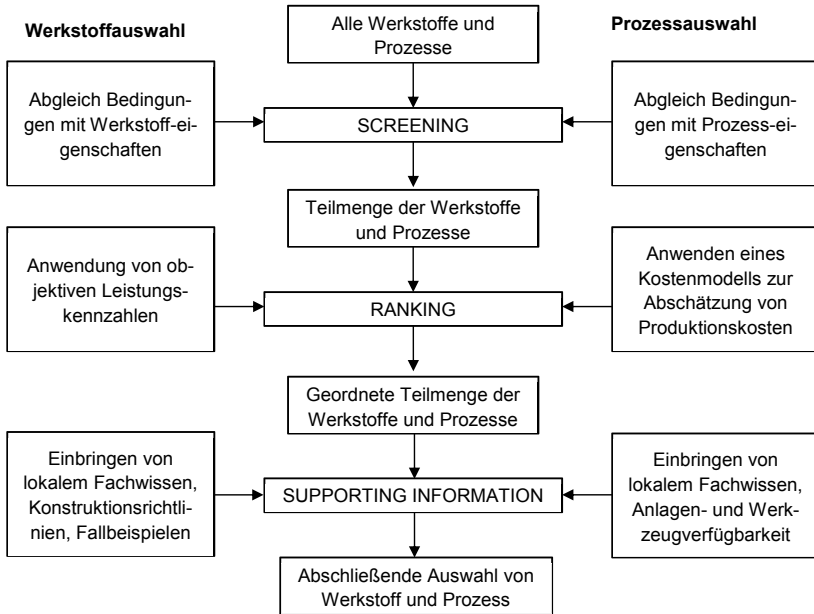


Bild 3.15: Schritte in der Werkstoff- und Prozessauswahl [ASHBY04, S. 56]

Die bei der Suche zum Einsatz kommenden relationalen Datenbanken weisen in der Regel eine wie in Bild 3.16 beschriebene Struktur auf. Werkstoff- und Prozessdaten werden voneinander unabhängig strukturiert abgelegt und über Beziehungen miteinander verknüpft. Darüber hinaus besteht eine Verknüpfung zu Quellen mit unstrukturierten Daten wie Textdateien oder Websites [ASHBY04, S. 56] (vgl. Bild 3.16).

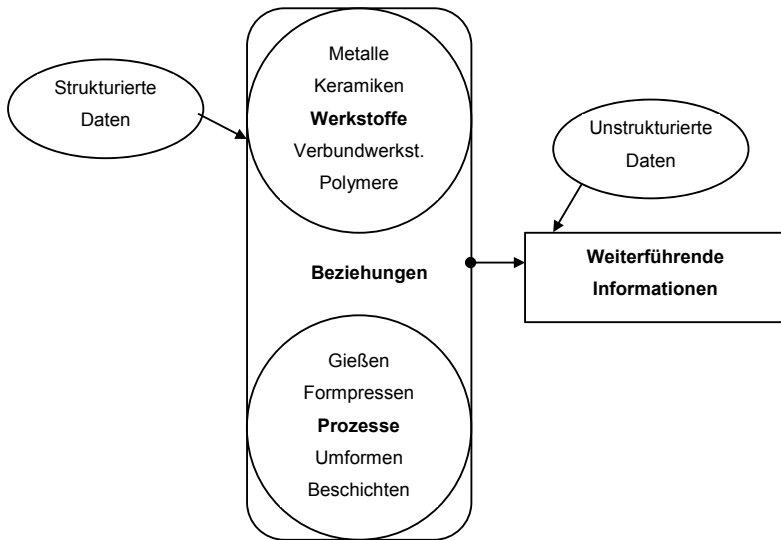


Bild 3.16: Struktur einer relationalen Datenbank [ASHBY04, S. 56]

Vorteil der Methodik ist, dass neue Werkstoffe oder Prozesse der Datenbasis hinzugefügt werden können und diese dem Konstrukteur angeboten werden, sofern sie hinsichtlich der Suchkriterien den bestehenden Werkstoffen oder Prozessen überlegen sind. Dies ermöglicht das Zustandekommen von innovativen Lösungen.

Ein Nachteil der Methodik ist die aufwändige und anspruchsvolle Formulierung der Anforderungen und Eingangsgrößen als Voraussetzung für die Zielfunktion sowie die Fähigkeit und Erfahrung des Konstrukteurs, unstrukturierte Daten zu finden und entsprechende Schlüsse daraus zu ziehen [ASHBY04, S. 57].

3.2.2.1 Giachetti

Giachetti beschreibt mit MAMPS („material and manufacturing process selection system“) ein Assistenzsystem zur Auswahl von Material und Fertigungsprozessen, basierend auf einer relationalen Datenbank zur Bewertung von Alternativen [GIACHETTI98, S. 267]. Als Ausgangsbasis für die Auswahl von Werkstoff und Fertigungsprozess werden Entscheidungskriterien hinsichtlich Werkstoff und Fertigungsprozess definiert. Jedoch können diese Kriterien nicht getrennt voneinander betrachtet werden. Bei der

Auswahl von Werkstoff und Prozess gibt es eine Reihe von Faktoren, welche sich gegenseitig bedingen. Yu [YU93] erweitert daher die von Giachetti [GIACHETTI98] beschriebenen Einflussfaktoren um diese Interdependenzen (vgl. Bild 3.17).

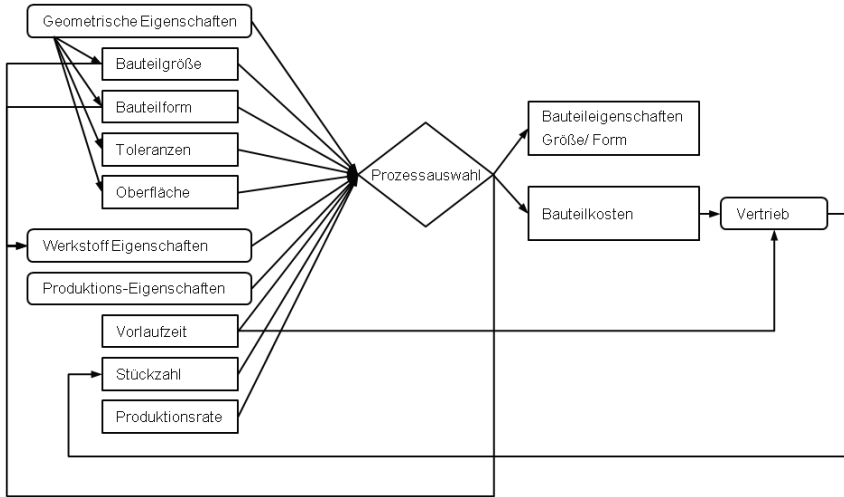


Bild 3.17: Abhängigkeiten in der Konstruktion [Yu93, S. 201]

Zur Unterstützung des Auswahlprozesses bietet das Assistenzsystem MAMPS drei Module. Dabei agieren das Werkstoff- und Fertigungsprozessauswahlmodul im ersten Schritt unabhängig, bevor das Vereinigungsmodul die Ergebnisse der einzelnen vorgeschalteten Module zu einem Kennwert zusammenführt (vgl. Bild 3.18).

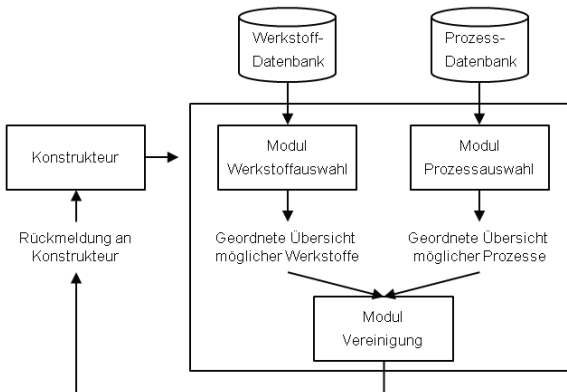


Bild 3.18: Architektur des Assistenzsystems MAMPS [GIACHETTI98, S. 268]

Fertigungsprozesse werden auf ihre charakteristischen Eigenschaften untersucht, um diese im Bewertungsprozess mit den Produkthanforderungen abgleichen zu können. Dabei zeigt Giachetti [GIACHETTI98] auf, dass sich Prozesseigenschaften als ein Profil mit einer unteren und einer oberen Grenze beschreiben lassen. Innerhalb dieser Grenzen lassen sich bei vielen Prozessen zwei unterschiedliche Bereiche ausmachen, der optimistische Bereich und der pessimistische Bereich (vgl. Bild 3.19).

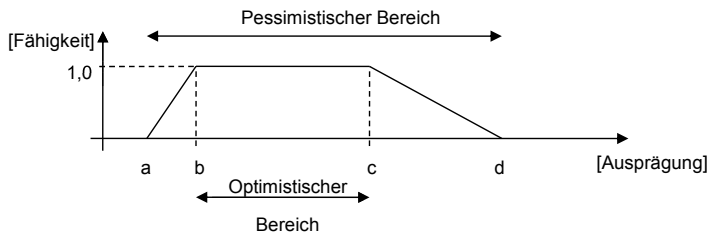


Bild 3.19: Profil der Prozesseigenschaften [GIACHETTI98, S. 271]

Damit lässt sich die Fähigkeit eines Fertigungsprozesses als das unscharfe Intervall $x \rightarrow \langle a, b, c, d \rangle$ beschreiben [GIACHETTI98, S. 267]. Auch Werkstoffeigenschaften lassen sich entsprechend der beschriebenen Gleichung erfassen, wobei diese oftmals genauer vorliegen. Für den Fall $a = b$ und $c = d$ ergibt sich aus der Gleichung ein scharfes Intervall, für $a = b = c = d$ ein einzelner Wert.

Diese Beschreibung nutzend, wird mit dem Werkstoff- und Fertigungsprozessmodul, basierend auf der Wahrscheinlichkeitstheorie, die Übereinstimmung zwischen den Produkthanforderungen und dem Werkstoff, beziehungsweise dem Fertigungsprozess ermittelt (für nähere Informationen zu dem verwendeten Algorithmus siehe GIACHETTI98). Hervorzuheben ist, dass sich der entwickelte Ansatz auf scharfe, unpräzise und linguistische Daten anwenden lässt.

Die im Vereinigungsmodul durchgeführte Zusammenführung der Informationen aus den beiden parallelen Modulen ermöglicht die Gewichtung der einzelnen Einflussfaktoren. Dazu wird ein kompensatorischer Operator um Gewichtungen erweitert und damit die beiden Kompatibilitäten Material $\mu_{mtl} = h(\mu_1, \dots, \mu_n)$ und Fertigungsprozess $\mu_{mf g} = h(\mu_1, \dots, \mu_m)$ ermittelt [GIACHETTI98, S. 271].

$$h(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) = \prod_{i=1}^n \mu_i^{r_i} \quad (3.5)$$

mit

$$r = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3.6)$$

Die Gesamtkompatibilität μ_{final} ergibt sich als

$$\mu_{final} = \sqrt{\mu_{mtl} * \mu_{mfg}} \quad (3.7)$$

Mit MAMPS liefert Giachetti [GIACHETTI98] einen Beitrag zur Auswahl von Material und Fertigungsprozessen in der Konzeptphase auf Basis der Fuzzy Logik.

Vorteil der Methodik ist die Transparenz der Auswahl. Mit der Bildung einer Kennzahl für die Überdeckung zwischen den Anforderungen an den Werkstoff und den Prozess sowie deren Fähigkeiten wird die Voraussetzung für die Auswahl der funktional optimalen Lösung geschaffen. Die Möglichkeit der Berücksichtigung von scharfen, unpräzisen und linguistische Daten vergrößert die Anzahl der verfügbaren Lösungen und verringert gleichzeitig den Aufwand der Pflege und Strukturierung dieser Daten.

Ein Nachteil der von Giachetti [GIACHETTI98] entwickelten Methodik ist, dass nur vollständige Datensätze untersucht werden können. Weiter wird die Bewertung, auf der die Auswahl basiert, rein nach funktionalen Kriterien durchgeführt. Die Wirtschaftlichkeit der Verbindungen wird dabei nicht berücksichtigt.

3.2.3 Prozessauswahl mittels Fragenkatalog

Fragenkataloge führen den Nutzer anhand eines strukturierten Ablaufs durch Entscheidungen, basierend auf einer integrierten Expertise, welche dem Nutzer nicht zu eigen ist. Im Hinblick auf die Auswahl von Material und Fertigungsprozess werden damit die Entscheidungswege und -logiken von Experten abgebildet. Experten werden mit einer Vielzahl von Anwendungsfällen konfrontiert, um anhand dieser die Entscheidungswege zu dokumentieren. Die Beschreibung der Entscheidungswege stellt gleichzeitig die Herausforderung der Methodik dar: Die Sicherstellung der Vollständigkeit jedes Entscheidungswegs sowie der Abgleich und die Vereinigung von Meinungen unterschiedlicher Experten [ASHBY04, S. 57].

Ein Vorteil von Fragenkatalogen ist, dass den Arbeitsergebnissen eines unerfahrenen Konstrukteurs, sofern er die Methodik befolgt, genauso vertraut werden kann wie

denen eines Experten [ASHBY04, S. 58]. Beispiele ([LOVATT98a]; [LOVATT98b]) zeigen, dass die Abbildung der Entscheidungswege von Experten für begrenzte Themenbereiche mit befriedigendem Detaillierungsgrad möglich ist. Im Vergleich zur quantitativen Analyse, bei welcher der Nutzer ebenfalls zu Beginn des Prozesses eine Reihe von Fragen beantwortet, sind in den Entscheidungen der Experten bereits Gewichtungen in Bezug auf die einzelnen Faktoren enthalten [ASHBY04, S. 58].

Ein Nachteil der Methodik ist, dass bei der Auswahl entsprechend einem Fragenkatalog nur solche Lösungen ermittelt werden können, welche bei der Dokumentation der Entscheidungswege der Experten berücksichtigt wurden. Ein Abweichen von diesen Entscheidungswegen ist nicht möglich, wodurch der Erstellung dieser eine hohe Relevanz zukommt. Innovationen sind ausgeschlossen, da nur solche Lösungen ermittelt werden, welche bereits bekannt sind. Neu hinzugefügte Materialien oder Prozesse werden nicht berücksichtigt, da sie dem Experten zum Zeitpunkt der Befragung nicht bekannt waren [ASHBY04, S. 58].

Mit den Ansatz von LeBacq [LEBACQ02] wird exemplarisch eine Vorgehensweise zum Einsatz von Fragebögen für die Auswahl von Verbindungen vorgestellt. Weitere, dieser Vorgehensweise folgenden Ansätze finden sich in [BLUEZE10; ESAWI04] und [L'EG-LISE01].

3.2.3.1 LeBacq

In der von LeBacq [LEBACQ02] vorgestellten Methode werden in einem ersten Schritt Lösungen eliminiert, welche technisch nicht möglich sind, bevor die übrigen Lösungen entsprechend der Übereinstimmung mit den Anforderungen bewertet und in eine Reihenfolge gebracht werden. Für das Ranking wird ein Fuzzy Ansatz verwendet [LEBACQ02, S. 406].

Ähnlich wie in der beschriebenen freien Suche werden die Anforderungen mit den in einer Datenbank hinterlegten Fähigkeiten von Prozessen abgeglichen. Der Prozess der Anforderungsbeschreibung wird jedoch im Gegensatz zu der von Giachetti [GIACHETTI98] beschriebenen freien Suche mittels eines Fragebogens unterstützt, welcher die Analyse- und Entscheidungsstrukturen von Experten abbildet. Damit wird unabhängig von Ausbildung und Erfahrung des Konstrukteurs sichergestellt, dass alle für die Auswahl des Prozesses notwendigen Informationen erfasst und berücksichtigt werden.

Das Ergebnis des Abgleichs der Anforderungen mit der Datenbank bekannter Prozesse ist ein Wert n_t [0–100 %], welcher die Übereinstimmung der Anforderung mit den in der Datenbank hinterlegten Fähigkeiten der Prozesse repräsentiert. Daran anschließend ist eine lokale Evaluation entsprechend den unternehmensspezifischen Randbedingungen wie Ausstattung, verfügbare Maschinen und Anwendungszusammenhang durchzuführen [LEBACQ02, S. 406].

Hinsichtlich der Befüllung der Datenbank mit den relevanten Informationen zur Prozessauswahl sieht Lebacq eine Expertenbefragung vor, deren Ergebnisse dann auch Konstrukteuren ohne deren Expertise zugänglich gemacht werden sollen. Dazu werden Verbindungsanforderungen auf vier Ebenen abgefragt [LEBACQ02, S. 407]:

Anforderungen an

1. die Geometrie der Verbindung
2. das Material der zu verbindenden Bauteile
3. die von der Verbindung zu erfüllende Funktion
4. die Voraussetzungen zur Anbringung der Verbindung

Die Angaben des Konstrukteurs zu genannten Fragen repräsentieren die technischen Anforderungen an die Verbindung. Zur weiteren Eingrenzung der in Frage kommenden Verbindungen werden diese mit einer Materialdatenbank abgeglichen. Da die Auslegung der Verbindung nicht Teil des Funktionsumfangs ist, beschränkt sich der Inhalt der Datenbank rein auf die maximale Betriebstemperatur sowie auf Kompatibilitäten zwischen den einzelnen Materialien hinsichtlich Kontaktkorrosion. Neben der Materialdatenbank stellt die Prozessdatenbank den wichtigsten Bestandteil der Methodik dar. Gegliedert nach Klebeverbindungen, Schweißverbindungen und mechanischen Verbindungen repräsentiert diese numerische und qualitative Informationen zu 42 unterschiedlichen Verbindungsprozessen [LEBACQ02, S. 408].

Ermöglicht wird der Abgleich durch eine identische Datenstruktur (Prozess/Material/Verbindungsgeometrie), sodass schrittweise Einzelaspekte abgeglichen und auf einer Skala von null bis zehn bewertet werden können [LEBACQ02, S. 409]. Anschließend werden alle Verbindungen, welche mindestens in einem Teilaspekt keine Übereinstimmung erzielt haben (0/10), als technisch nicht realisierbar klassifiziert. Für die übrigen Verbindungen gilt es ein multikriterielles Problem zu lösen, wobei die einzelnen Bewertungsfaktoren zu einem Gesamtfaktor zusammengeführt werden. Dazu wird eine Fuzzylogik eingesetzt. Ergebnis ist die Übersicht der technisch nicht möglichen Prozesse (mit Begründung) sowie eine sortierte Übersicht der möglichen Verbindungen, geordnet nach der Übereinstimmung mit den vom Konstrukteur formulierten Anforderungen [LEBACQ02, S. 410].

Lebacq beschreibt, dass sich an diese technische Analyse der verfügbaren Prozesse eine weitere Untersuchung hinsichtlich der Prozesskosten anschließen kann. Diese ist jedoch nicht Teil der Studie [LEBACQ02, S. 410].

Vorteile der von Lebacq beschriebenen Methodik sind die transparente, lösungs-neutrale Erfassung von Anforderungen sowie die strukturierte Erfassung von Informationen zu den Prozessen durch eine Expertenbefragung. Damit wird gewährleistet, dass Konstrukteure unabhängig von ihrer Erfahrung und Ausbildung zu denselben Lösungen kommen wie die für die Erzeugung der Datenbasis befragten Experten.

Aus der Abbildung des Expertenwissens in dem Fragebogen resultiert gleichzeitig der größte Nachteil des Systems. Zum einen werden nur solche Lösungen berücksichtigt, welche den Experten bekannt sind, zum anderen reagiert das System sehr langsam

auf Innovationen, da diese erst dem Experten bekannt sein müssen, bevor dieses erweiterte Expertenwissen dann bei einer erneuten Befragung erfasst, dokumentiert und implementiert werden kann.

3.2.4 Prozessauswahl mittels fallbasiertem Schließen

Grundlage für fallbasiertes Schließen ist die Erfahrung aus der Vergangenheit. Konstruktionsanforderungen werden in Form einer Menge von Problemen als Eingangsgröße für den Transformationsprozess formuliert, anhand welcher gelöste Probleme aus der Vergangenheit auf Übereinstimmung ein oder mehrerer Anforderungen untersucht werden. Bei ausreichender Übereinstimmung wird die Übertragbarkeit der Lösungen aus der Vergangenheit auf das aktuelle Problem überprüft [ASHBY04, S. 59]. Vorteil ist die Verringerung des konstruktiven Aufwands. Die Methodik kann zu einem höheren Grad von Standardisierung führen, da für gleiche Anforderungen stets dieselbe Lösung herangezogen wird. Herausforderung ist das Erzeugen der Datenbasis, sodass gelöste Probleme mit ausreichender Wahrscheinlichkeit wiedergefunden werden [ASHBY04, S. 59].

Heutzutage wählen viele Konstrukteure den Fertigungsprozess aufgrund ihrer Erfahrung und Intuition hinsichtlich der Vielzahl an Einflussfaktoren aus [YU93, S. 199]. Die von Yu [YU93] beschriebenen Einflussfaktoren auf die Auswahl des Prozesses überschneiden sich deutlich mit den von Giachetti [GIACHETTI98] genannten:

- Mechanische Eigenschaften
- Materialien
- Teilegeometrie
- Teilegröße
- Toleranzen und Oberflächenbeschaffenheit
- Time-to-market
- Produktionsvolumen
- Zykluszeit

Diese Einflussfaktoren werden mit einer Datenbank von bekannten Prozessen abgeglichen und Übereinstimmungsfaktoren für Geometrie, Material und Produktion ermittelt. Vorteil der von Yu [YU93] vorgestellten Methodik ist die Berücksichtigung unterschiedlicher Einflussfaktoren und deren Interdependenzen. Die Anwendung bekannter, bereits existierender Lösungen auf neue Probleme führt einerseits zu einem steigenden Grad der Standardisierung. Die Übertragung bestehender Lösungen auf neue

Probleme schließt andererseits die Entstehung neuer, besserer Lösungen aus. Zudem erfolgt keine Gewichtung der Faktoren, sodass Faktoren, welche wenig Einfluss auf Produkt und Prozess haben, die Auswahl in gleicher Weise beeinflussen wie solche, welche für Funktionalität oder Wirtschaftlichkeit einen großen Einfluss haben.

3.2.5 Zusammenfassung Unterstützung der Prozessauswahl

Die Notwendigkeit der Unterstützung der Auswahl von Werkstoff und Fertigungsprozess in der Konzeptphase der Produktentwicklung ist bereits seit den 1990er-Jahren bekannt [EHRENSPIEL92, S. 180]. Bestehende Ansätze lassen sich drei Strategien zuordnen: Freier Suche, Fragenkatalog und fallbasiertem Schließen. Die Untersuchung entsprechend dem in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Kriterienkatalog liefert die Vor- und Nachteile der einzelnen Strategien.

Die freie Suche ermöglicht die Generierung neuer, applikationsspezifischer Lösungen, bedingt jedoch die anspruchsvolle und aufwendige Beschreibung von Zielfunktionen durch den Konstrukteur. Fragenkataloge bieten mit der Nachbildung der Entscheidungsstrukturen von Experten allen Konstrukteuren, unabhängig von deren Erfahrung und Ausbildung, die Möglichkeit zur selben Lösung zu gelangen wie die befragten Experten. Die Abbildung der Vorgehensweisen erfordert jedoch die aufwendige Befragung einer Vielzahl von Experten. Zudem können innovative Lösungen nicht zustanden kommen. Das fallbasierte Schließen vergleicht die aktuelle Problemstellung mit bereits gelösten Problemstellungen. Ziel ist es bei gleicher oder ähnlicher Problemstellung die erarbeitete Lösung zu übernehmen. Damit wird Arbeitsaufwand reduziert und zur Standardisierung beigetragen. Dies geht jedoch zu Lasten der Berücksichtigung neuer Werkstoffe und Prozesse.

Die untersuchten Strategien liefern eine wertvolle Unterstützung der Auswahl von Werkstoff und Fertigungsprozess in der Konzeptphase des Produktentwicklungsprozesses. Dabei können die beschriebenen aktuellen und zukünftigen Anforderungen der variantenreichen Serienfertigung jedoch von keiner Strategie hinlänglich befriedigt werden. Insbesondere fehlt die Einbeziehung neuer Werkstoffe und Verbindungstechniken. Darüber hinaus erfolgt bei bestehenden Ansätzen die Auswahl ausschließlich nach dem Kriterium der Funktionalität. Die Wirtschaftlichkeit wird nicht ausreichend berücksichtigt, stellt jedoch für Unternehmen der variantenreichen

Serienfertigung aufgrund der hohen Stückzahlen ein überaus wichtiges Kriterium dar (vgl. Tabelle 3.4).

Kriterium ○ nicht erfüllt ● bedingt erfüllt ● erfüllt	Prozessauswahl mit- tels freier Suche [ASHBY04; GIACHETTI98]	Prozessauswahl mit- tels Fragenkatalog [LEBACQ02]	Prozessauswahl mit- tels fallbasiertem Schließen [YU93]
Berücksichtigte Verbindungen	●	●	●
Berücksichtigung von Kosten	○	○	○
Detaillierungsgrad	●	●	●
Abbildung unterschiedlicher Varianten	●	●	●
Erweiterbarkeit	●	●	●
Wartungs-/Erstellungsaufwand	○	○	●
Integration externen Wissens	○	●	●

Tabelle 3.4: Bewertung der Ansätze zur Unterstützung der Prozessauswahl

4 Konkretisierung der Aufgabenstellung und Ableiten von Anforderungen

Die Anforderungen an eine Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung gehen aus der Analyse des Produktentwicklungs- und Produktionsprozesses eines Automobilunternehmens (vgl. Kapitel 2) sowie der Projektion der beschriebenen Trends (vgl. Kapitel 1.2) auf die dort analysierte Situation hervor. Der Abgleich der Herausforderungen mit bestehenden Ansätzen in Wissenschaft und Technik (vgl. Kapitel 3) grenzt den Forschungsbereich ab.

Im Rahmen der Konkretisierung der Aufgabenstellung werden für das übergeordnete Ziel (Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Produktion) die zu realisierenden Teilziele abgeleitet. Die daraus resultierenden Anforderungen werden anschließend ermittelt und in einer Anforderungsliste zusammengeführt.

4.1 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Mit der Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen für die variantenreiche Serienfertigung lassen sich Handlungsanweisungen für Konstruktionsaufgaben in der Konzeptphase des Produktentwicklungsprozesses ableiten. Übergeordnetes Ziel ist die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Produktion durch die Unterstützung der Auswahl von lösbaren Verbindungen im Konstruktionsprozess.

Zur Realisierung des übergeordneten Ziels sind drei Teilziele zu erfüllen:

1. Vollständige Beschreibung des Lösungsraums für die zu verbindenden Bauteile:

Zur Sicherstellung der optimalen Auswahl entsprechend dem gewählten Optimierungskriterium ist sicherzustellen, dass alle im Lösungsraum enthaltenen Lösungen bekannt sind und berücksichtigt werden. Dabei ist der Detaillierungsgrad so zu wählen, dass eine belastbare funktionale und wirtschaftliche Bewertung durchgeführt werden kann.

2. Auswahl der technisch realisierbaren Verbindungen:

Zur Gewährleistung der Berücksichtigung der in (1.) beschriebenen Anforderungen an den Detaillierungsgrad der im Lösungsraum befindlichen Verbindungen bedarf es der methodischen Unterstützung bei der Auswahl der technisch

realisierbaren Verbindungen. Der Rückgriff auf eine für alle Probleme identische Menge anwendbarer Verbindungen ist aufgrund des zu geringen Detaillierungsgrades nicht möglich (vgl. Kapitel 3.2).

3. Berücksichtigung der Methodik im Konstruktionsprozess:

Zur Absicherung des Einsatzes der Methodik im Konstruktionsprozess ist diese prozessual und informationstechnisch in die unternehmensspezifischen Prozesse und (IT-)Infrastruktur zu integrieren.

4.2 Ableitung der Anforderungen an die Auswahl von lösbaren Verbindungen

Zur Gliederung der Anforderungen wird die in Bild 4.1 beschriebene Struktur verwendet. Dabei lassen sich drei Ebenen unterscheiden: Das Assistenzsystem vereinigt die Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen und die Einbindung in die Prozesse und (IT-)Infrastruktur. Die Methodik besteht aus Methoden zur Definition des Lösungsraums, der Auswahl technisch realisierbarer Verbindungen und zur wirtschaftlichen Bewertung der Verbindungen (vgl. Bild 4.1).

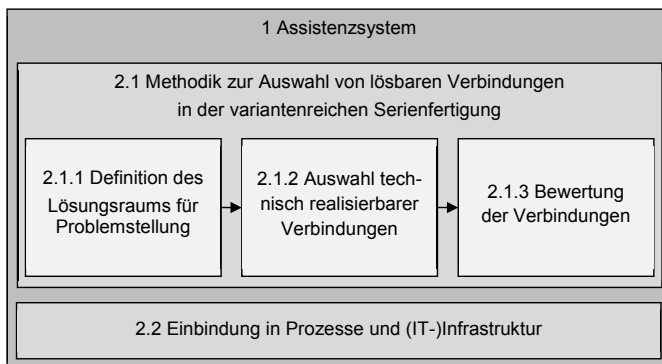


Bild 4.1: Analyse und Gliederung der Aufgabenstellung

Die Anforderungen der einzelnen Ebenen resultieren aus dem Abgleich der Beobachtungen in der Praxis (vgl. Kapitel 2) mit den in der Literatur bekannten Ansätzen (vgl. Kapitel 3) und werden im Folgenden detailliert beschrieben und in einer Anforderungsliste zusammengeführt (vgl. Tabelle 4.1).

1 Gesamtsystem (Assistenzsystem)

Für eine gegebene Kombination an Bauteilen sind alle technisch möglichen lösbaren Verbindungen zu ermitteln und ganzheitlich entsprechend der verursachten Aufwendungen in der Produktion zu bewerten. Die Spezifizierung der Bauteile und Anforderungen an die Verbindungen (z. B. Positioniergenauigkeit, Wasserdichtheit, Lösbarkeit) durch den Konstrukteur ist dabei zu unterstützen. Die Einbindung in die System- und Prozesslandschaft ermöglicht die Verfügbarkeit und sichert den Einsatz des Assistenzsystems.

2.1: Handlungsanweisungen (Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung)

Für eine Menge von Bauteilen und Anforderungen an die Verbindung sind die mögliche Verbindungsszenarien durch die Kombination der die Verbindung definierenden Faktoren (Anzahl Verbindungspunkte, Verbindungstechnik und Dimensionierung der Verbindungstechnik (vgl. Kapitel 2.1)) zu ermitteln. Für jedes Verbindungsszenario sind lösbare Verbindungen entsprechend geltender Normen, Standards oder etablierter Vorgehensweisen auszulegen.

2.1.1: Definition des Lösungsraums für Problemstellung

Für die zu verbindenden Bauteile sind entsprechend der durch den Konstrukteur beschriebenen Anforderungen die möglichen Verbindungsszenarien durch eine systematische Variation der Anzahl der Verbindungspunkte und deren Konfiguration (Anordnung auf der Verbindungsfläche) zu ermitteln. Diese sind um die zu übertragenden Kräfte zu ergänzen.

2.1.2: Auswahl technisch realisierbarer Verbindungen

Für die zu berücksichtigenden lösbaren Verbindungen sind auf Basis der durch den Konstrukteur definierten Anforderungen technisch mögliche Verbindungen zu ermitteln. Die Auswahl der Verbindungen ist durch das Assistenzsystem auszuführen.

Die Architektur des Assistenzsystems ist so zu wählen, dass spezifisches Wissen zu den einzelnen Verbindungen gekapselt, gespeichert und genutzt werden kann. Weiter ist eine Architektur zu wählen, die die Erweiterbarkeit des Assistenzsystems um neue,

innovative Verbindungen erlaubt. Bei der Auslegung der Verbindung ist die Berücksichtigung von unternehmensspezifischen Standards zu ermöglichen.

2.1.3: Bewertung der Verbindungen

Für die Bewertung der Verbindung sind sämtliche in der Produktion verursachten Aufwendungen zu ermitteln und zusammenzuführen. Neben der Fertigungszeit und Betriebsmitteln wie Werkzeugen und sind Aufwendungen für Qualität und Logistik in die Bewertung zu integrieren. Ergebnis der Bewertung einer Verbindung ist eine zentrale Kenngröße, welche den Vergleich zwischen verschiedenen lösbaren Verbindungen ermöglicht.

Dem Konstrukteur ist eine Liste aller technisch möglichen Verbindungen, geordnet nach den konsolidierten Aufwendungen, zur Verfügung zu stellen und um Möglichkeiten der Auswertung (Sortierung nach einzelnen Kriterien) zu ergänzen, sodass der Vergleich unterschiedlicher Verbindungen innerhalb eines Verbindungsszenarios und zwischen den Verbindungsszenarien ermöglicht wird.

2.2: Einbindung in Prozesse und (IT-)Infrastruktur

Die Einbindung in die (IT-)Infrastruktur stellt sicher, dass das Assistenzsystem für jeden Konstrukteur zu jedem Zeitpunkt verfügbar ist. Die Integration in die Konstruktionsumgebung stellt die Verfügbarkeit auch bei dezentralen Teams von Entwicklern sicher. Mittels einer prozessualen Verankerung wird der Einsatz des Assistenzsystems sichergestellt.

Da sich die beschriebenen Herausforderungen bei der Auswahl von lösbaren Verbindungen auch in anderen Unternehmen der variantenreichen Serienfertigung finden (weiße Ware, Möbel, IT), ist eine übertragbare und skalierbare Lösung anzustreben.

Anforderungsliste für Assistenzsystem zur Auswahl der Montage-Verbindung					
Firma:		GSaME		Projektnr.:2010_01	
Ausgabe vom:		28.06.13			
Bearbeiter:		Rusitschka, F. (FR)		Ers. Ausg. V.:	
F W	Nr.	Anforderungen Forderung (F), Wunsch (W)	Be- schrei- bung, Quant.	Ver- antw./ Quelle	Ände- rung
1 Gesamtsystem (Assistenzsystem)					
F	1.1	Für zwei vollständig spezifizierte Bauteile und eine Menge funktionaler Anforderungen sind alle technisch möglichen, lösbaren Verbindungen zu ermitteln und zu bewerten.		FR	
2.1 Handlungsanweisungen (Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung)					
F	2.1.1	Unterstützung des Konstrukteurs bei der Auswahl und Auslegung von Montage-Verbindungen.		FR	
F	2.1.2	Methodische Ermittlung des Lösungsraums durch Variation der Anzahl der Verbindungspunkte, der Verbindungstechnik und deren Dimensionierung		FR	
F	2.1.3	Vergleich unterschiedlicher lösbarer Verbindungen auf Basis der verursachten Aufwendungen in der Produktion		FR	
2.1.1 Definition des Lösungsraums für Problemstellung					
F	2.1.1.1	Ermittlung von Verbindungsszenarien durch Variation von Anbindungspkt. und deren Orientierung		FR	
F	2.1.1.2	Berechnung der resultierenden Kräfte pro Verbindungspunkt		FR	
2.1.2 Auswahl technisch realisierbarer Verbindungen					
F	2.1.2.1	Ermittlung der technisch möglichen Verbindungen durch Abgleich der Fähigkeiten der berechneten Verbindungen mit den Anforderungen und ermittelten Kräften.		FR	
2.1.3 Bewertung der Verbindungen					
F	2.1.3.1	Ermittlung der verursachten Aufwendungen in der Produktion für lösbare Verbindungen		FR	
F	2.1.3.2	Zusammenführung der Einzelaufwendungen zu den Gesamtaufwendungen		FR	
W	2.1.3.3	Sortierung der Gesamtliste nach Gesamtaufwendungen und nach einzelnen Aufwendungen		FR	
2.2 Einbindung in Prozesse und (IT-)Infrastruktur					
F	2.2.1	Einbindung in die Konstruktionsumgebung		FR	
F	2.2.2	Erweiterbarkeit um neue Verbindungen		FR	

Tabelle 4.1: Anforderungsliste für Assistenzsystem zur Auswahl der Montage-Verbindung

5 Methodik zur Auswahl von lösba- ren Verbindungen

Entsprechend der in Kapitel 4 definierten Anforderungen wird mit der Methodik zur Auswahl von lösba- ren Verbindungen die Grundlage eines Assistenzsystems für den Konstruktionsprozess geschaffen, das Konstrukteure bei der Auswahl und Auslegung von lösba- ren Verbindungen unterstützt. Neben funktionalen Kriterien, wie den zu über- tragenden Kräften und Lasten, werden auch wirtschaftliche Kriterien, wie die Ferti- gungszeit oder die Einzelteilkosten berücksichtigt. Die notwendigen Einzelschritte wer- den in einem Ablaufdiagramm in Verbindung zueinander gesetzt (vgl. Kapitel 5.1) und anschließend näher beschrieben.

Die der Auswahl zugrundeliegenden Schritte (vgl. Kapitel 4.2), der Definition des Lö- sungsraumes (vgl. Kapitel 5.2), Ableitung der Verbindungen (vgl. Kapitel 5.3) und Be- wertung der Verbindungen (vgl. Kapitel 5.4) finden sich im Anschluss an das Ablaufdi- agramm.

5.1 Ablaufdiagramm des Assistenzsystems für die Auswahl von lösba- ren Verbindungen

Bezogen auf den vierstufigen Produktentwicklungsprozess nach Pahl [PAHL05, S. 194] (Planen, Konzipieren, Entwerfen, Ausarbeiten) lässt sich die Auslegung der Verbin- dung der Phase des Entwurfs zuordnen (vgl. Bild 5.1). Diese Einordnung korrespon- diert mit den Beobachtungen aus der Praxis (vgl. Kapitel 2.2), in der die Auswahl und Auslegung der Verbindungen von den für die Module verantwortlichen Konstrukteuren in den Produktentwicklungsprozess eingeordnet wurden.

Grundannahme der im Folgenden beschriebenen Methodik ist, dass eine Verbindung wie ein Produkt behandelt werden kann. Damit lassen sich etablierte Vorgehenswei- sen der Produktgestaltung, wie das Definieren einer Anforderungsliste, die methodi- sche Auswahl und die wissensbasierte Ausgestaltung auf die Verbindungsauswahl und -gestaltung übertragen. Zur weiteren Strukturierung der Methodik wird daher der viergliedrige Produktentwicklungsprozess von Pahl/Beitz verwendet (vgl. Bild 5.1).

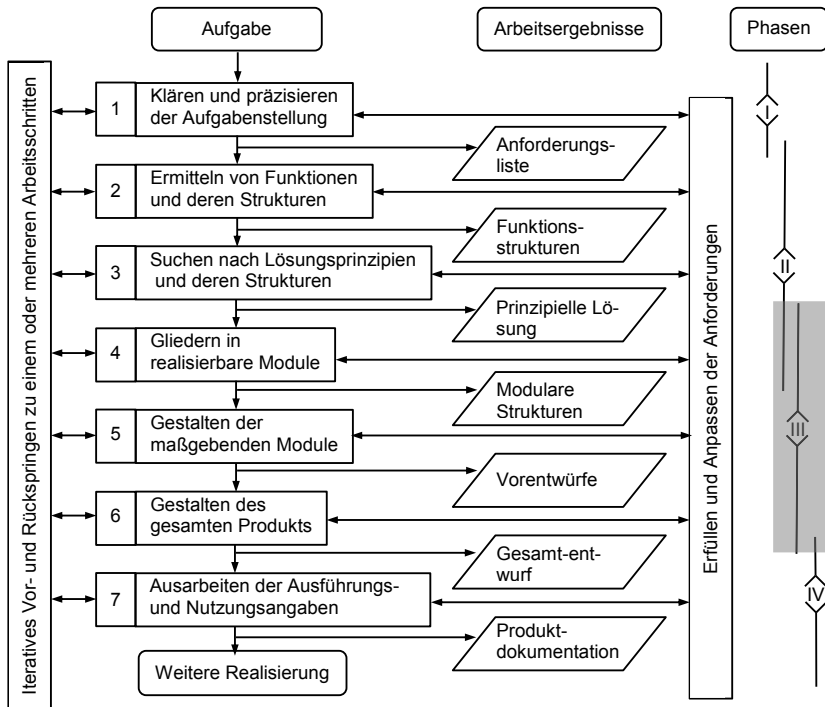


Bild 5.1: Einordnung der Auswahl und Auslegung von Montage-Verbindungen in den Konstruktionsprozess (grau markiert) nach [VDI93b, S. 9]

Entsprechend dem Grundgedanken der Produktentwicklung – die richtigen Dinge richtig tun [BINZ11, S. 81] – sind die Kernaufgaben der Auswahl und Auslegung von lösbaren Verbindungen in der Konzeption und dem Entwurf zu sehen. Im Rahmen der Konzeption werden die möglichen Prinzipialösungen für die gegebene Aufgabenstellung aufgezeigt und bewertet. Mit der Auswahl der technisch und wirtschaftlich optimalen Prinzipiallösung („das Richtige“) erfolgt der Übergang in die Entwurfsphase. Im Rahmen dieser wird die Prinzipiallösung detailliert und in die Konstruktion übertragen. Bei diesem

Konkretisierungsschritt sind sowohl Qualitätsaspekte als auch Produkt- und Prozessstandardisierungen zu berücksichtigen („richtig tun“).

Die dem Assistenzsystem zugrunde liegenden Arbeitsschritte lassen sich, wie in Bild 5.1 beschrieben, in die dritte Phase, die Entwurfsphase des Produktentstehungsprozesses einordnen. Dieser Verbindungsentstehungsprozess wird wie der Produktentstehungsprozess in vier Phasen gegliedert (vgl. Bild 5.2). Der Einsatz der beschriebenen Arbeitsschritte richtet sich nach den an die Verbindung gestellten Anforderungen. Die Kriterien werden in den Kapiteln 5.1.1–5.1.4 näher beschrieben.

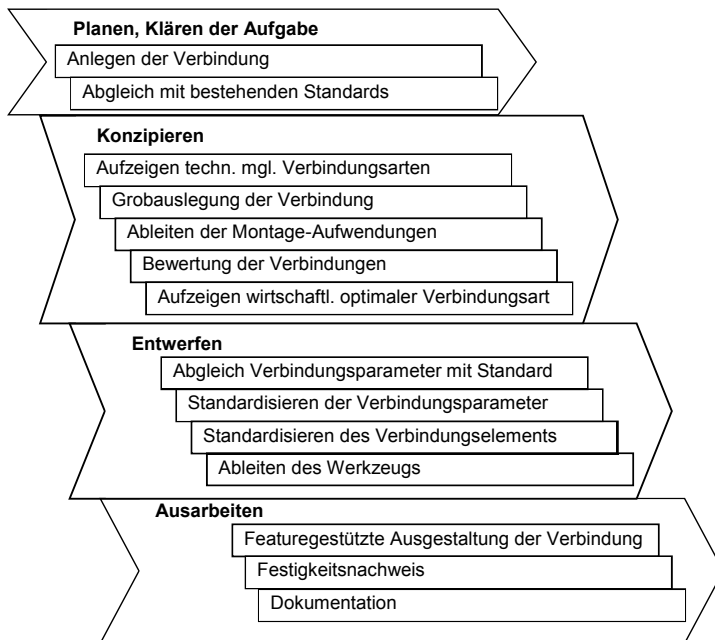


Bild 5.2: Arbeitsschritte bei der Auswahl und Auslegung von lösbaren Verbindungen

5.1.1 Planen der Verbindung, Klären der Anforderungen

Im Rahmen der Planung und Klärung der Aufgabe werden die zu verbindenden Bauteile spezifiziert sowie Anforderungen an die Verbindung erfasst. Die Ermittlung der Informationen erfolgt dabei zur Sicherstellung einer durchgängigen Datenstruktur mittels einheitlichen Formularen. Ergebnis des Schritts ist eine standardisierte

Anforderungsliste beziehungsweise ein standardisiertes Anforderungsprofil der Verbindung, welches die Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte darstellt.

Im Hinblick auf den weiteren Datenaustausch ist die Speicherung der Daten und Informationen in einem strukturierten Format sicherzustellen, um den Austausch mit unterschiedlichen Systemen und Diensten zu ermöglichen. Zur kontinuierlichen Dokumentation der weiteren Aktivitäten erfolgt die Vergabe eines eindeutigen Namens an die Verbindung.

Der automatisierte Abgleich mit Industrie- und Unternehmensstandards sichert deren Berücksichtigung, sorgt für Standardisierung und verhindert Doppelarbeit. Für viele Bauteile sind unternehmensspezifische Standards definiert, welche für ein breites Produktspektrum gültig sind und das Gesamtoptimum darstellen. Dabei müssen sie nicht zwingend für alle im Produktspektrum enthaltenen Produkte die wirtschaftlichste Lösung beschreiben. Verbindungsumfänge, für welche bereits ein Standard besteht, werden nicht weiter untersucht. Dem Konstrukteur werden direkt alle Informationen zu dem bestehenden Standard zur Verfügung gestellt.

5.1.2 Konzipieren und Bewerten möglicher Verbindungen

Für Verbindungsaufgaben, bei welchen während der Planung und Klärung der Aufgabe (vgl. Kapitel 5.1.1) kein bestehender und gültiger Standard ermittelt werden konnte, werden die möglichen lösbaren Verbindungen konzipiert. Der Arbeitsschritt beginnt mit der Beschreibung des Lösungsraums für das gegebene Anforderungsprofil. Darauf aufbauend, werden für die technisch möglichen Verbindungen Grobentwürfe erzeugt. Die Bestimmung der aus den Grobentwürfen in der Montage resultierenden Aufwendungen ermöglicht die Bewertung. Ergebnis ist eine nach den Aufwendungen geordnete Liste der Verbindungen.

Zur Beschreibung des Lösungsraums werden für die zu verbindenden Bauteile unterschiedliche Verbindungsszenarien VS_i erstellt. Ein Verbindungsszenario beschreibt die Anzahl und Anordnung der Verbindungspunkte VP_j . Verbindungspunkte repräsentieren lösungsneutral die Kontaktstellen zwischen den zu verbindenden Bauteilen, durch welche die Kräfte übertragen werden, beziehungsweise der Zusammenhalt hergestellt wird. Für die Verbindungspunkte $VP_{j,i}$ eines jeden Verbindungsszenarios VS_i werden die zu übertragenden Kräfte $F_{x,j,i}, F_{y,j,i}, F_{z,j,i}$ ermittelt. Eingangsgrößen für die Ermittlung der Kräfte sind das Anforderungsprofil an die Verbindung sowie das Lastprofil, welches die zu erwartenden Betriebskräfte beschreibt (vgl. Volkswagen AG09).

Das allgemeine Anforderungsprofil AP wird damit zu einer Menge von Anforderungsprofilen AP_i erweitert. Jedes AP_i enthält die allen Anforderungsprofilen gemeinen Anforderungen an die Verbindung AP_{allg} (Dichtheit, Positioniergenauigkeit, Lösbarkeit) sowie die aus dem Verbindungsszenario VS_i resultierenden Anforderungen AP_{VS_i} (Anzahl der Verbindungspunkte und deren Anordnung).

$$AP_i = AP_{allg} + AP_{VS_i} \quad (5.1)$$

Für jedes Anforderungsprofil AP_i sind im nächsten Schritt die bekannten Verbindungen auf technische Machbarkeit zu prüfen. Dazu werden die Anforderungen mit den Fähigkeiten der entsprechenden Verbindungstechnik verglichen. Um der Anforderung der Erweiterbarkeit und Kapselung von Wissen gerecht zu werden, ist das Wissen zu den einzelnen Verbindungstechniken VT_m in einzelnen Modulen hinterlegt (vgl. Bild 5.3).

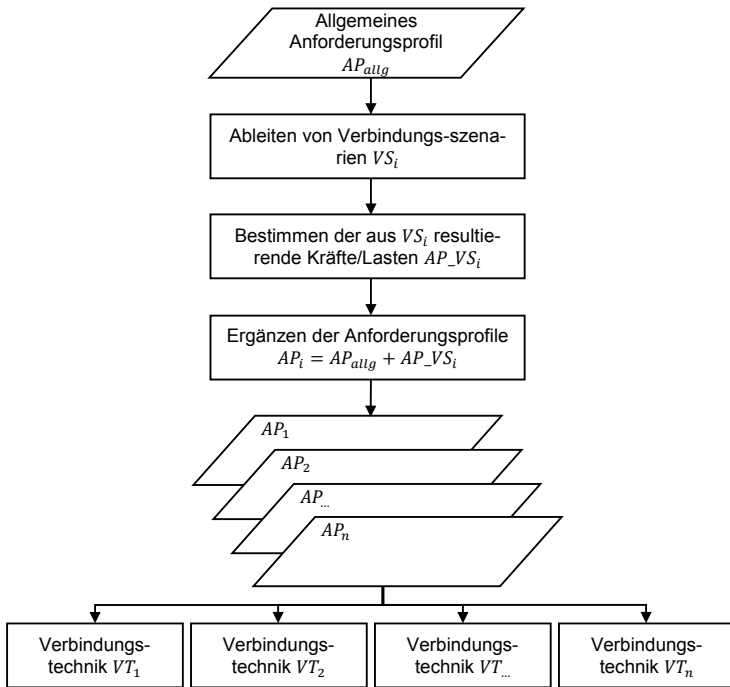


Bild 5.3: Zuordnung der Anforderungsprofile zu den Verbindungstechniken

Die Architektur des Assistenzsystems orientiert sich dabei an der serviceorientierten Architektur von Softwaresystemen, bei welcher vielfältige, verschiedene und eventuell inkompatible Methoden als wiederverwendbare und offen zugreifbare Dienste repräsentiert werden [MELZER10, S. 13].

Der Aufbau eines modularen Assistenzsystems ermöglicht im Gegensatz zu einem integrierten System die schrittweise Erweiterung des Gesamtsystems sowie die Berücksichtigung neuer Montage-Verbindungen. Dazu lassen sich unterschiedliche Methoden und Algorithmen für die Auslegung dieser in den einzelnen Modulen abbilden. Die Module können in drei Kategorien eingeteilt werden (vgl. Bild 5.4).

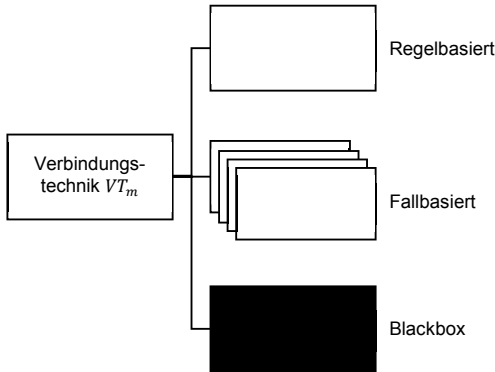


Bild 5.4: Module zur Auslegung von Verbindungen mit unterschiedlichen Methoden

Über eine standardisierte Schnittstelle werden, dem Prinzip eines Marktplatzes folgend, jedem der Module VT_m , alle Anforderungsprofile AP_S in Form von XML Dateien zur Verfügung gestellt. Jedes der Module vergleicht diese Anforderungsprofile mit dem Fähigkeitsprofil der repräsentierten Verbindungen und gibt als Ergebnis entweder einen Grobentwurf für die Verbindung oder die Mitteilung zurück, dass das Anforderungsprofil technisch nicht erfüllt werden kann (vgl. Bild 5.5).

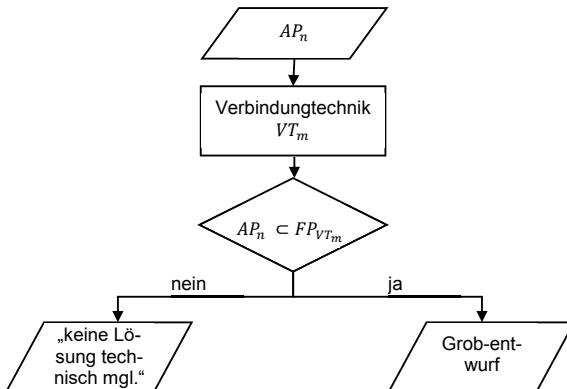


Bild 5.5: Abgleich des Anforderungsprofils mit dem Fähigkeitsprofil FP_{VT_m} der Verbindungstechnik VT_m und Erzeugen von Grobentwürfen

Mit dieser Vorgehensweise werden parallel für jedes Anforderungsprofil AP_i m Grobentwürfe erzeugt (m : Anzahl der in Modulen hinterlegten lösbaren Verbindungen), wodurch sich die Anzahl der im Lösungsraum befindlichen und zu bewertenden Verbindungsvarianten VV als das Produkt aus den Anforderungsprofilen und Montage-Verbindungstechniken ergibt:

$$VV = s * m \quad (5.2)$$

mit s : Anzahl Anforderungsprofile

m : Anzahl lösbarer Verbindungstechniken

Für die Bewertung der Verbindungen sind alle Aufwendungen zu berücksichtigen, die durch diese verursacht werden. Dabei sind auch die vorgelagerten Prozessschritte zu betrachten. Die Vorgehensweise zur ganzheitlichen Ermittlung der Aufwendungen lässt sich in vier Schritte unterteilen:

1. Ermittlung der Prozessschritte, in welchen durch die Verbindung Aufwendungen entstehen
2. Ermittlung der Aufwendungen für die einzelnen Prozessschritte
3. Umrechnung der Aufwendungen in eine monetäre Größe
4. Zusammenführung aller Aufwendungen

Grundlage für die Erfassung der zu berücksichtigenden Prozessschritte sind die zu verbindenden Bauteile. Ausgehend von der finalen Verbindung sind all vorbereitenden Tätigkeiten, wie das Einbringen von Bohrungen und Gewinden, Verdrehsicherungen oder Beschichtungen und der Verbindungsprozess zu ermitteln. Entsprechend diesen Prozessschritten sind die dafür notwendigen Aufwendungen zu ermitteln. Dabei kann es sich um Einzelteilkosten, Fertigungszeiten oder Betriebsmittel handeln. Zur Umrechnung dieser in eine monetäre Größe sind die unternehmens- und standortspezifischen Umrechnungsfaktoren (z. B. Fertigungspersonalkosten von ca. 40 €/h in Deutschland) anzunehmen. Die Umrechnung ermöglicht die Konsolidierung des Gesamtaufwands.

Für die Automobilindustrie ergeben sich die relevanten Prozessschritte als:

- Presswerk (z. B. Einbringen von Löchern mittels Laserstrahltrennverfahren)
- Karosseriebau (z. B. Fügen von Schweißmuttern und -bolzen)
- Lackiererei (z. B. Lackschutz von Massebolzen in der Lackiererei)
- Montage (z. B. Befestigen mit Schraube in Schweißmutter)

Eine detaillierte Beschreibung zur Erfassung und Zusammenführung der Aufwendungen findet sich in Kapitel 5.4.1.

Die Zusammenführung aller Verbindungsvarianten *VV* und deren Bewertungen liefert dem Konstrukteur die vollständige Übersicht der technisch möglichen Verbindungen für ein Anforderungsprofil, verbunden mit der Möglichkeit, diese nach einzelnen Bewertungskriterien oder dem übergeordneten Kriterium der Wirtschaftlichkeit zu sortieren. Jede der Verbindungsvarianten enthält bereits Informationen zu den für die Produktion benötigten Einzelteile, Werkzeuge und Prozesse.

Die Phase der Konzeption wird mit der Auswahl einer Verbindungstechnik aus der Übersicht der technisch möglichen Verbindungen abgeschlossen (Prinzipielle Lösung, vgl. Bild 5.1). In der Ausarbeitungsphase sind die Verbindungselemente und Montageprozessgrößen für die ausgewählte Verbindung auf Konformität mit den unternehmens- und branchenspezifischen Standards zu prüfen und ggf. anzupassen.

5.1.3 Entwerfen der Verbindung

Die in der Konzeptphase erarbeitete Prinziplösung enthält bereits grundsätzliche Montageprozessgrößen und Anforderungen an die Verbindungselemente. Diese werden in der Entwurfsphase weiter detailliert und mit den bestehenden Unternehmens- und Branchenstandards abgeglichen. Die Relevanz dieses Schrittes ergibt sich aus der in der variantenreichen Serienfertigung notwendigen Standardisierung zur Reduzierung der Komplexität (vgl. Kapitel 1.1).

Sowohl für das Produkt (Verbindungselemente) als auch für den Prozess (Montageprozessgrößen) wird hierzu eine eigene Referenz aufgebaut. Für die Verbindungselemente besteht diese aus der Übersicht der zu bevorzugenden Teile (Standard Verbindungselemente *SVE*), für die Montageprozessgrößen aus der Übersicht der zu verwendenden Parameter (Standard Prozessgrößen *SMP*). Der Abgleich der im Grobentwurf hinterlegten Verbindungselemente (*VE*) und Montageprozessgrößen (*MP*) mit den definierten Standards zeigt etwaigen Handlungs- und Anpassungsbedarf auf. Bei den Standards handelt es sich, im Gegensatz zu den in Kapitel 5.1.1 abgefragten Standards für Befestigungskonzepte, um bauteilunabhängige Informationen zu Verbindungselementen und Produktionsprozessen.

Die Anpassung der im Grobentwurf hinterlegten Verbindungselemente oder Montageprozessgrößen wird durch Konstruktionswissen in Form von Konstruktionsprinzipien unterstützt. Dazu werden konstruktive Hinweise zur Verfügung gestellt, wo und wie der Entwurf anzupassen ist, damit die Standards eingehalten werden können. Nach der Anpassung des Grobentwurfs erfolgt die erneute Überprüfung der Verbindungselemente und Montageprozessgrößen auf Konformität mit den Standards. Bei positiver Prüfung ist die Detaillierung des Grobentwurfs abgeschlossen (vgl. Bild 5.6). Abschließend wird die Verbindung um die für die Fertigung und Montage notwendigen Werkzeuge und Anlagen ergänzt.

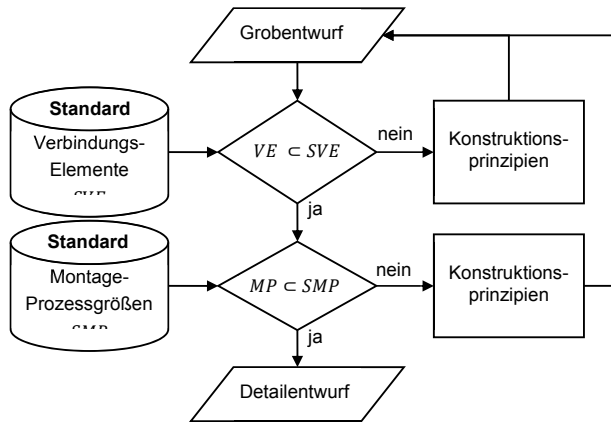


Bild 5.6: Standardisierung von Verbindungselementen und Montageprozessgrößen

5.1.4 Ausarbeiten der Verbindung

Der abschließende Schritt des Ausgestaltens beinhaltet das Übertragen des detaillierten Entwurfs der Verbindung in die Konstruktion. Dazu werden die in der Detaillösung hinterlegten Informationen dem Konstrukteur in Form von Features zur Verfügung gestellt. Damit entfällt der Zeitaufwand für die Suche nach den Geometrie- und Metadaten. Die Gefahr von Übertragungsfehlern wird hierdurch eliminiert.

Für den komplettierten Zusammenbau ist anschließend ein Festigkeitsnachweis zu erbringen. Dieser erfolgt konventionell, analog zum Produktentwicklungsprozess ohne Assistenzsystem. Zur Dokumentation des Entscheidungsprozesses, der Montageprozessgrößen und Verbindungselemente wird unter der eindeutigen Bezeichnung der Verbindung (vgl. Kapitel 5.1) das eingangs beschriebene integrierte Produkt- und Prozessmodell abgelegt.

Die zur Auswahl von lösbaren Verbindungen entwickelten Methoden werden im Folgenden detailliert beschrieben. Grundlage sind die in Kapitel 4.2 definierten Anforderungen.

Die Beschreibung der Verbindung als Produkt in einem integrierten Produkt- und Prozessmodell (vgl. Kapitel 5.2) ermöglicht die systematische Beschreibung des Lösungsraums und Generierung der unterschiedlichen Verbindungsszenarien (vgl. Kapitel 5.3.1) sowie die Ableitung der zu übertragenden Kräfte und Lasten (vgl. Kapitel 5.3.2). Auf deren Basis werden die Grobentwürfe erzeugt und bewertet (vgl. Kapitel 5.4).

5.2 Integriertes Produkt- und Prozessmodell

Die Konsolidierung der Dokumentation von Produkt- und Prozessinformationen liefert die Grundvoraussetzung für die weiteren Schritte zur assistierten Auswahl und Auslegung der Verbindung, da für die ganzheitliche Bewertung sowohl Produkt- als auch Prozessinformationen zu berücksichtigen sind. Dazu wird ein hierarchisches Modell entwickelt, in dem neben Produktinformationen auch die Prozessinformationen beschrieben sind, und welches die für die weitere Vorgehensweise notwendige Detailtiefe aufweist.

Auf Basis der Systemtheorie werden die zu verbindenden Bauteile als Elemente im System des Zusammenbaus beschrieben. Im Gegensatz zu bestehenden Produktbeschreibungen wird die Verbindung dabei jedoch nicht als die Beziehung zwischen den zu verbindenden Bauteilen, sondern als eigenständiges Element im System des Zusammenbaus beschrieben (vgl. Bild 5.7).

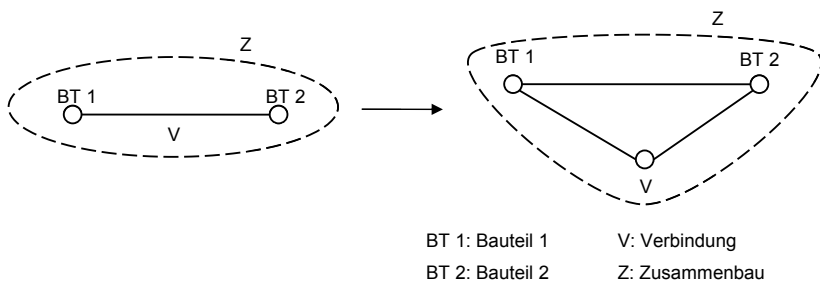


Bild 5.7: Verbindung als Beziehung oder als Element im System des Zusammenbaus

Die Elemente, die die Bauteile repräsentieren, enthalten die charakterisierenden Informationen wie Geometrie, Werkstoff und Gewicht. Diese teilweise voneinander abhängigen Informationen werden über den Produktentwicklungsprozess schrittweise vervollständigt und verfeinert. Das die Verbindung repräsentierende Element enthält Informationen zur Verbindungstechnik sowie zu den Montage- und Fertigungsprozessen.

Die Beziehungen zwischen den zu verbindenden Bauteilen und der Verbindung schafft Transparenz über die Zusammenhänge. Sie können bei jeder Änderung an einem der die Bauteile repräsentierenden Elemente des Zusammenbaus zur Überprüfung der Kompatibilität zwischen diesem und den übrigen Elementen verwendet werden. Dazu werden die in den Bauteilelementen hinterlegten Spezifikationen und die Anforderungen an die Verbindung mit den im Verbindungselement hinterlegten Fähigkeiten abgeglichen.

Die Formulierung der Verbindung V als eigenständiges Element im System des Zusammenbaus Z ermöglicht dazu die weitere Detaillierung der Verbindung in Form eines Subsystems, bestehend aus den einzelnen Verbindungspunkten VP_i und deren Beziehungen zueinander (vgl. Bild 5.8).

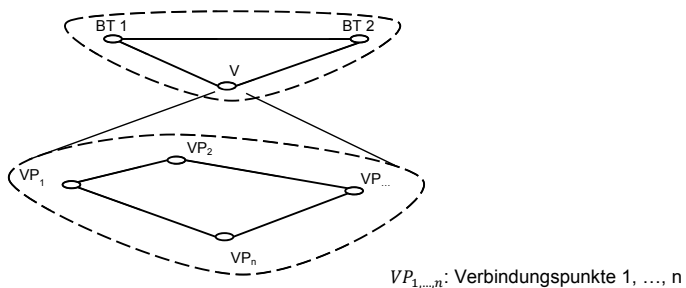


Bild 5.8: Subsystem der Verbindung V , bestehend aus Verbindungspunkten VP_i

Ein Verbindungspunkt VP_i beschreibt dabei die Lage und Eigenschaften einer Verbindungsstelle vollständig. Jeder der Verbindungspunkte repräsentiert ein eigenes Subsystem, in welchem die Verbindungselemente, Hilfselemente (vgl. Bild 5.9) und zugehörigen Fertigungs- und Montageprozesse beschrieben werden (vgl. Bild 5.10).

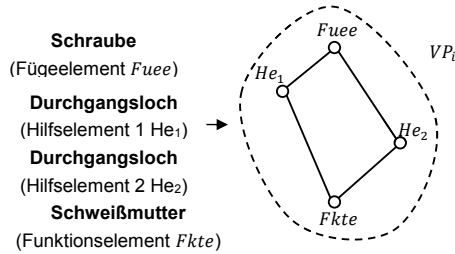


Bild 5.9: Systemische Beschreibung eines Verbindungspunktes VP_i

Zur Beschreibung der Produktinformationen werden drei Arten von Elementen unterschieden:

Fügeelement (F_{uee}): Element, das den Zusammenhalt herstellt (z. B. Schraube).

Funktionselement (F_{kte}): Element, das die Funktion des Fügeelementes ermöglicht (z. B. Mutter).

Hilfselement (He_i): Element, das für den Zusammenbau notwendig ist, dabei keine direkte Funktion übernimmt, jedoch für die Verbindung notwendig ist (z. B. Durchgangsloch).

Ein Verbindungspunkt wird dabei immer von genau einem Fügeelement und einem Funktionselement beschrieben. Dazu können ein oder mehrere Hilfselemente ergänzend notwendig sein.

Zur Integration der Prozessinformationen werden die Beschreibungen der Produktinformationen des Verbindungspunktes (vgl. Bild 5.9) um die Prozessinformationen ergänzt (vgl. Bild 5.10).

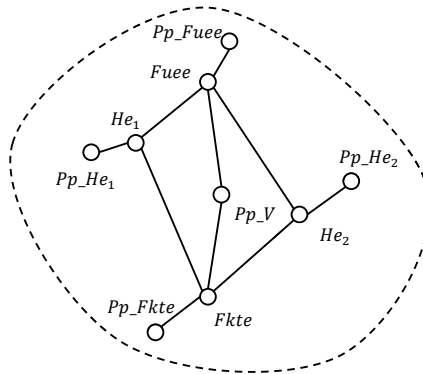


Bild 5.10: Vollständige Beschreibung eines Verbindungspunktes

Die Beschreibung der Prozessinformationen (Produktionsprozess PP) erfolgt durch vier Arten von Elementen:

- | | |
|------------------------------------|---|
| PP Verbindung (Pp_V): | Prozess des Verbindens von Füge- und Funktionselement (z. B. Verschrauben einer Schraube in einer Mutter). |
| PP Fügeelement (Pp_Fuee): | Prozess des Verbindens des Fügeelementes mit dem zu verbindenden Bauteil (z. B. Einschieben einer Schnappverbindung in eine Führung). |
| PP Funktionselement (Pp_Fkte): | Prozess des Verbindens des Funktionselementes mit dem zu verbindenden Bauteil (z. B. Anschweißen einer Schweißmutter). |
| PP Hilfselement i (Pp_He_i): | Prozess des Erzeugens des Hilfselementes (z. B. Bohren einer Durchgangsbohrung). |

Ein Verbindungspunkt wird immer genau von einem Produktionsprozess Verbindung Pp_V beschrieben. Dazu können Produktionsprozesse für Füge- und Funktionselement sowie für ein oder mehrere Hilfselemente notwendig sein.

Die Ergänzung der ersten beiden Ebenen des Verbindungsmodells (vgl. Bild 5.8) um die Elemente des Verbindungspunktes führt zu dem dreistufigen Modell einer Verbindung (vgl. Bild 5.11).

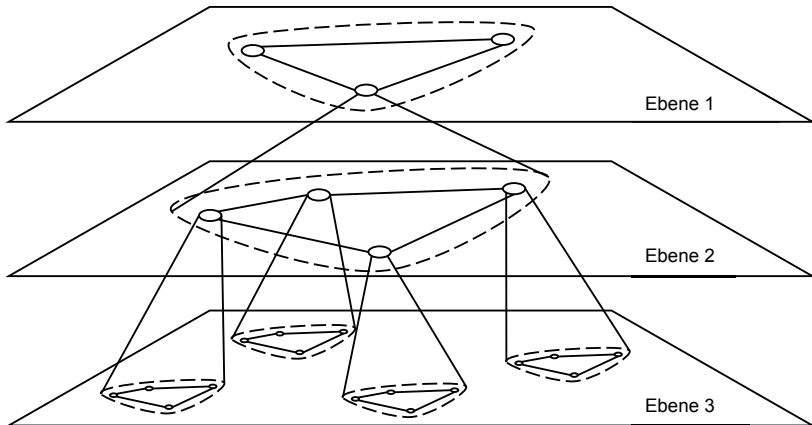


Bild 5.11: Drei Ebenen einer Verbindung

Die integrierte hierarchische Produkt- und Prozessbeschreibung ermöglicht mit der Variation der Anzahl und Anordnung der Verbindungspunkte auf der zweiten Ebene (vgl. Bild 5.11) die systematische Ermittlung aller möglichen Verbindungsszenarien und bildet damit die Voraussetzung für die Methodik zur Auswahl und Auslegung der lösbaren Verbindungen.

5.3 Beschreibung des Lösungsraums durch die Ermittlung von Verbindungsszenarien

Der Lösungsraum für die Verbindung zwischen zwei Bauteilen wird maßgeblich von der Anzahl und Anordnung der Verbindungspunkte bestimmt (zweite Ebene der Verbindung, vgl. Bild 5.11). Ein Verbindungspunkt beschreibt dabei eine Verbindungsstelle mit allen Verbindungselementen, Fertigungs- und Montageprozessen. Im Falle einer Schraubverbindung sind dies:

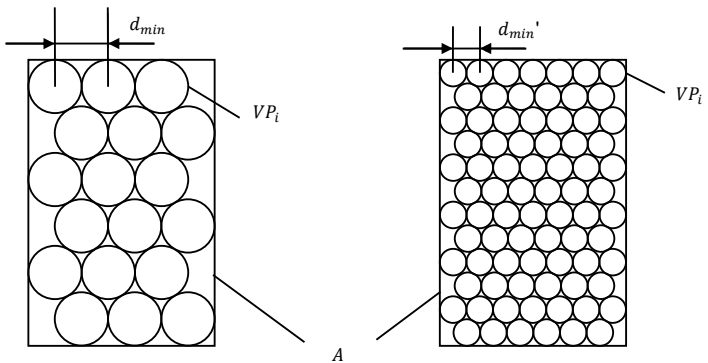
- Verbindungselemente: Schraube, Mutter
- Fertigungsprozesse: Einbringen der Durchgangsbohrung in Bauteil 1 und Bauteil 2
- Montageprozess: Verschrauben der Bauteile 1 und 2 mit Schraube und Mutter

Die Fertigungs- und Montageprozesse werden regelbasiert aus den Eigenschaften der Bauteile und den Anforderungen an die Verbindung abgeleitet.

Ein Verbindungsszenario definiert neben den zu verbindenden Bauteilen und deren Charakteristika die Anzahl und Anordnung der Verbindungspunkte. Damit beschreibt das Verbindungsszenario die Verbindung zwischen den Bauteilen allgemein und ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Ausprägungen der Verbindungspunkte.

5.3.1 Ermittlung der Verbindungsszenarien

Die Anzahl der möglichen Verbindungsszenarien hängt maßgeblich von der Menge der zu berücksichtigenden Verbindungspunkte ab. Diese wird durch den minimalen Abstand zwischen zwei Verbindungspunkten d_{min} bestimmt (vgl. Bild 5.12). Der minimale Abstand d_{min} ist entsprechend der Fertigungstechnologien zu wählen. Für eine Schraubverbindung beispielsweise berechnet sich d_{min} aus dem Durchmesser und der für den Werkstoff notwendigen Wandstärke. Zusammen mit der für die Verbindung zur Verfügung stehenden Kontaktfläche A ergibt sich aus dem Abstand d_{min} die maximale Anzahl der Verbindungspunkte VP_{thmax} .



A : Kontaktfläche zwischen den zu verbindenden Bauteilen

VP_i, VP_i' : Verbindungspunkt

d_{min}, d_{min}' : minimaler Abstand zwischen Verbindungspunkten VP_i, VP_i'

Bild 5.12: Anzahl der möglichen Verbindungspunkte VP_{thmax} in Abhängigkeit des minimalen Abstand d_{min}

Die Kontaktfläche A wird durch die Projektion des kleineren Bauteils auf das größere Bauteil definiert. Damit beschreibt die Kontaktfläche die theoretisch zur Verfügung stehende Fläche für Verbindungspunkte zwischen den zu verbindenden Bauteilen. Der Konstrukteur kann die projizierte Fläche im Falle von großen zu übertragenden Kräften erweitern oder bei eingeschränkter Zugänglichkeit verkleinern.

Unterbrochene Flächen werden in Teilflächen zerlegt. Für jede der Teilflächen wird die theoretisch mögliche Anzahl der Verbindungspunkte ermittelt und diese abschließend zusammengeführt (vgl. Bild 5.13).

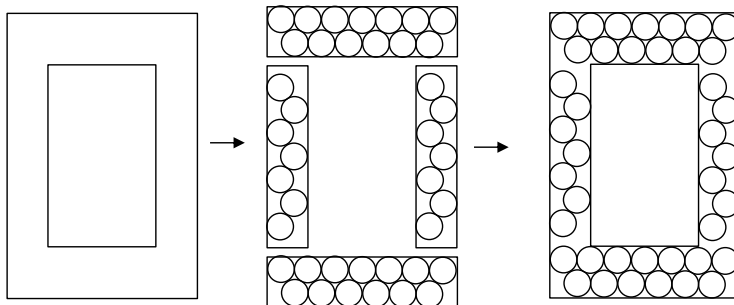


Bild 5.13: Ermittlung der Anzahl der möglichen Verbindungspunkte VP_{thmax} bei unterbrochenen Flächen

Basierend auf der Ermittlung der theoretisch maximalen Anzahl der Verbindungspunkte VP_{thmax} für eine gegebene Kontaktfläche A zwischen zwei Bauteilen $BT1$, $BT2$ erfolgt die Ableitung der Verbindungsszenarien VS_i . Die Anzahl der Verbindungsszenarien wird von der optional zu definierenden Anzahl der maximal zu berücksichtigenden Verbindungspunkte VP_{max} mit

$$VP_{max} \leq VP_{thmax} \quad (5.3)$$

begrenzt und durch Permutation der einzelnen Verbindungspunkte ermittelt.

Die Permutation beschreibt die Anordnung von n Elementen in einer bestimmten Reihenfolge. Bei der Permutation ohne Wiederholung sind alle n Elemente eindeutig identifizierbar. Damit gibt es für das erste Element n unterschiedliche Platzierungsmöglichkeiten, für das zweite Element bleiben hingegen nur noch $n - 1$ Positionen zur

Auswahl, da bereits ein Platz vom ersten Element belegt ist. Dabei ist jede Konfiguration mit jeder kombinierbar, womit Permutationen entstehen [KOHNO5, S. 189]:

$$n! = n \times (n - 1) \times \dots \times 2 \times 1 \quad (5.4)$$

In dem zu untersuchenden Fall lassen sich zwei Arten von Elementen unterscheiden: Verbindungspunkte, die zur Kraftübertragung genutzt werden ($VP_{genutzt}$) und solche, die nicht zur Kraftübertragung genutzt werden und damit ungenutzt bleiben ($VP_{ungenutzt}$). Dabei gilt:

$$VP_{thmax} = VP_{genutzt} + VP_{ungenutzt} \text{ mit } 1 \leq VP_{genutzt} \leq VP_{thmax} \quad (5.5)$$

Aufgrund der Tatsache, dass die genutzten Verbindungspunkte sich hinsichtlich ihrer Funktion nicht voneinander unterscheiden, handelt es sich um eine Permutation mit Wiederholung. Bei dieser sind unter den n Elementen k Elemente, welche nicht voneinander zu unterscheiden sind. Diese lassen sich somit untereinander vertauschen, ohne dass sich eine neue Reihenfolge ergibt [KOHNO5, S. 189 f.], woraus sich $k!$ identischen Permutationen ergeben:

$$k! = k \times (k - 1) \times \dots \times 2 \times 1 \quad (5.6)$$

Die Permutationen für eine Anzahl von n Elementen, unter welchen k Elemente identisch sind, ergibt:

$$\frac{n!}{k!} = (k + 1)(k + 2) \times \dots \times (n - 1)n \quad (5.7)$$

Da neben den genutzten Verbindungspunkten auch die ungenutzten Verbindungspunkte nicht voneinander unterschieden werden, handelt es sich bei der Ermittlung der Verbindungsszenarien um eine Permutation mit Wiederholung und mehreren Gruppen r , mit n_1, \dots, n_r nicht unterscheidbaren Elementen ($n_1 + \dots + n_r = n$). Die Anzahl der Permutationen hierfür ergibt sich aus dem Multinomialkoeffizienten [KOHNO5, S. 189 f.]:

$$\frac{n!}{n_1! \times \dots \times n_r!} \quad (5.8)$$

Mit der maximalen Anzahl der Verbindungspunkte VP_{max} ergeben sich für j genutzte Verbindungspunkte $VP_{genutzt,j}$ die Verbindungsszenarien VS_i :

$$\begin{aligned} VS_i &= \frac{VP_{thmax}!}{VP_{genutzt,j}! \times (VP_{thmax} - VP_{genutzt,j})!} \\ &= \frac{VP_{thmax}!}{VP_{genutzt,j}! \times VP_{ungenutzt,j}!} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Die Gesamtmenge aller Verbindungsszenarien $VS_{i,gesamt}$ ergibt sich durch die Variation der genutzten Verbindungspunkte ($j = 1, \dots, VP_{max}$) und Addition der resultierenden Verbindungsszenarien:

$$VS_{i,gesamt} = \prod_{j=1}^{VP_{max}} \frac{VP_{thmax}!}{VP_{genutzt,j}! \times VP_{ungenutzt,j}!} \quad (5.10)$$

Für jedes Verbindungsszenario sind damit die Anzahl der möglichen Verbindungspunkte und deren Position bekannt. Diese geometrischen Informationen werden im folgenden Schritt um die zu übertragenden Kräfte ergänzt. Die auf das Verbindungssystem einwirkenden Kräfte sind dabei für alle Verbindungsszenarien gleich groß, jedoch verteilen sich die Kräfte auf die einzelnen Verbindungspunkte entsprechend der Anzahl und Anordnung dieser. Für die Grobauslegung der Verbindung wird im Folgenden mit der vereinfachten Annahme der gleichmäßigen Verteilung der Lasten auf die Verbindungspunkte ausgegangen (vgl. [VDI2230, S. 18]).

5.3.2 Berechnung der an den Verbindungspunkten zu übertragenden Kräfte

Im Folgenden wird die Verbindung als eine einfache, symmetrische und relativ steife Verbindung [VDI2230, S. 18] angenommen. Damit lassen sich die Anforderungen an die einzelnen Verbindungspunkte als einfache Zerlegung der Betriebskraft gewinnen [VDI2230, S. 18] und als zentrische Einschraubenverbindungen berechnen (vgl. Bild 5.14).

















Einschraubenverbindungen		Mehrschraubenverbindungen						Schraubenverb.	
zentrisch oder exzentrisch		in einer Ebene		rotationssymmetrisch			symmetrisch	asymmetrisch	Schraubenachsen
Zylinder oder prismatischer Körper	Balken	Balken	Kreisplatte	Flansch mit Dichttring	Flansch mit Flächenauflage	rechteckige Mehrschraubenverbind.	Mehrschraubenverbind.		
								Geometrie in Ebene	
								Belastung relevante Lasten	
Axialkraft F_A Querkraft F_Q Betriebsmoment M_B	Axialkraft F_A Querkraft F_Q Moment in der Balkenhauptebene M_z	Axialkraft F_A Querkraft F_Q Moment in der Balkenhauptebene M_z	Innendruck p	Axialkraft F_A (Rohrkraft) Betriebsmoment M_B Innendruck p	Axialkraft F_A Torsionsmoment M_T Betriebsmoment M_B	Axialkraft F_A Querkraft F_Q Torsionsmoment M_T Betriebsmoment M_B	Axialkraft F_A Querkraft F_Q Torsionsmoment M_T Betriebsmoment M_B	Kräfte und Momente	
VDI 2230		bedingt nach VDI 2230		bedingt nach VDI 2230					
Balkenbiegetheorie mit Zusatzbedingungen		Plattentheorie		DIN 2505 AD-Merkb. B7 VDI 2230 (bedingt)		bedingt nach Ersatzmodellen		Berechnung	
Finite Elemente Methode (FEM)									

Bild 5.14: Berechnung von Mehrschraubenverbindungen [VDI2230, S. 9]

Die von der Verbindungstechnik zu übertragende Kraft ergibt sich aus der Gewichtskraft F_G und der Beschleunigungskraft F_B .

$$F_G = m \times g \tag{5.11}$$

$$F_B = m \times a \tag{5.12}$$

Die Masse m bezieht sich auf das Anbauteil und lässt sich aus der Geometrie und den Werkstoffkennwerten berechnen. Zur Quantifizierung der auftretenden Beschleunigungen sind die Betriebslasten zu bestimmen. Für den Bereich der Automobilindustrie sind diese in Form einer nicht veröffentlichten Norm festgelegt. Diese, in einem Gemeinschaftsprojekt von mehreren führenden Herstellern gemeinsam entwickelte Norm, gibt zum einen ein Lastprofil, zum anderen Werte für physische Schocks vor, die Anbauteile ohne Beschädigung aushalten müssen [Volkswagen AG09]. Entsprechend der Norm sind getrennte Versuche in den drei Raumrichtungen vorgesehen.

Mittels der Beschleunigungen aus den Lastprofilen, der Geometrie und der Werkstoffe der Bauteile sowie der Anzahl und Anordnung der Verbindungspunkte lassen sich die an den Verbindungspunkten auftretenden Kräfte bestimmen.

Die für die Auswahl und Auslegung von Montage-Verbindungen relevanten Größen sind die Axialkraft F_A und die Querkraft F_Q . Axial- und Querkräfte beziehen sich dabei auf die Trennfuge: Für den ebenen Fall wird die gleichmäßige Verteilung der Kräfte

auf die Verbindungspunkte angenommen. Die Querkraft setzt sich aus den Kräften in x- und y-Richtung zusammen und lässt sich aus der geometrischen Addition ermitteln:

$$\vec{F}_Q = \vec{F}_x + \vec{F}_y \quad (5.13)$$

Entsprechend ergibt sich der Betrag der Querkraft als

$$F_Q = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (5.14)$$

Während die Axialkraft nur von einer Komponente beeinflusst wird:

$$F_A = F_z \quad (5.15)$$

Das Ergebnis des Berechnungsschritts ist die Übersicht der theoretisch möglichen Verbindungsszenarien. Jedes Verbindungsszenario beschreibt die Anzahl und Anordnung der Verbindungspunkte sowie die auf diese Verbindungspunkte wirkenden Kräfte. Die Verbindungsszenarien sind die Eingangsgröße für die Ermittlung der unterschiedlichen Grobentwürfe.

5.4 Ganzheitliche Bewertung von Montage-Verbindungen

Zur Identifikation der wirtschaftlichsten Prinziplösung ist die ganzheitliche, transparente und vergleichbare Bewertung der durch die Verbindung verursachten Aufwendungen erforderlich. Dabei sind nicht nur die in der Montage anfallenden Aufwendungen zu berücksichtigen, sondern auch die in den vorgelagerten Prozessschritten verursachten Aufwendungen.

In weiten Teilen der Automobilindustrie hat sich die Gliederung des Fertigungsprozesses in Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Montage etabliert. Diese Aufteilung wird auch für die Methodik zur ganzheitlichen Bewertung von lösbaren Verbindungen verwendet.

Verbindungen verursachen neben dem eigentlichen Fügeprozess eine Vielzahl weiterer Aufwendungen, innerhalb und außerhalb der Montage. Die Methodik zur Zusammenführung der Aufwendungen wird am Beispiel von Schraubverbindungen verdeutlicht. Nähere Informationen zur ganzheitlichen Bestimmung der Montageaufwendungen finden sich in [RUSITSCHKA11].

5.4.1 Erfassung der Aufwendungen der lösbaren Verbindungen

Die alleinige Betrachtung des Fügens innerhalb der Montage genügt für die Bewertung einer lösbaren Verbindung nicht. Die Gesamtaufwendungen einer Verbindung VA_i ergeben sich als die Summe der Aufwendungen aus dem Presswerk PA_i , dem Karosseriebau KA_i , der Lackiererei LA_i und der Montage MA_i .

$$VA_i = PA_i + KA_i + LA_i + MA_i \quad (5.16)$$

Aufwendungen innerhalb der Montage

Entsprechend der definierten Aufteilung der Montage nach Lotter [LOTTER06, S. 2] setzt sich jeder Montageprozess MP_i aus fünf Teilprozessen zusammen (Fügeprozesse MP_i^{FP} , Handhabungsprozesse MP_i^{HP} , Ausrichtungsprozesse MP_i^{AP} , Kontrollprozesse MP_i^{KP} und Sonderprozesse MP_i^{SP}). Diese Teilprozesse lassen sich für jede Verbindung spezifisch ermitteln und mit Aufwendungen versehen. Die aus manuellen Tätigkeiten resultierenden Aufwendungen können zu einem Zeitwert aufsummiert werden.

$$MP_i = MP_i^{FP} + MP_i^{HP} + MP_i^{AP} + MP_i^{KP} + MP_i^{SP} \quad (5.17)$$

Dabei ist zu beachten, dass der lokale Fertigungslohn LFL in die Berechnung der Aufwendungen eingeht. Die aus einer Verbindung resultierenden Aufwendungen MA_i^{FP} sind damit abhängig vom Fertigungsstandort.

$$MA_i^{FP} = LFL \times MP_i \quad (5.18)$$

Neben den reinen Prozesskosten fallen im Bereich der Montage Aufwendungen für Werkzeuge und Betriebsmittel MA_i^W (untergliedert in Beschaffungskosten $MA_i^{Winitial}$ und Betriebskosten $MA_i^{Wlaufend}$) und Aufwendungen für Verbindungselemente $MA_i^{Einzelteil}$ an. Die Gesamtaufwendungen für die Montage MA_i ergeben sich damit zu

$$MA_i = MA_i^{FP} + MA_i^{Winitial} + MA_i^{Wlaufend} + MA_i^{Einzelteil} \quad (5.19)$$

Zur Bezifferung der Betriebskosten ist die Kenntnis des Produktionsvolumens und der Einbaurrate notwendig. Die Einbaurrate gibt an, in wie vielen Produkten des gesamten Produktionsvolumens das zu untersuchende Teilprodukt enthalten ist.

Dazu ist jedes Produkt m eines Produktionsprogramms M auf seine Teilprodukte TP_m zu untersuchen. In der variantenreichen Serienfertigung können dabei zwei Arten von Teilprodukten unterschieden werden. Standard Teilprodukte TP^S , die in jedem Produkt

verbaut werden, und optionale Teilprodukte TP^o , die nur in einem Teil des Produktionsprogramms verbaut werden. Die Menge der Teilprodukte TP eines Produktionsprogramms M ergibt sich damit zu:

$$TP = \bigcup_{\forall m \in M} TP_m = \bigcup_{\forall m \in M} TP_m^s + \bigcup_{\forall m \in M} TP_m^o \quad (5.20)$$

Mittels der Unterteilung in standardisierte Teilprodukte und optionale Teilprodukte lassen sich die Aufwendungen für die Werkzeuge und deren Instandhaltung auf die betreffenden Verbindungen umlegen. Bei den Verbindungselementen wie Schrauben, Muttern oder Schnappverbindungen handelt es sich größtenteils um zugekaufte Normteile. Diese Normteile werden in Unternehmen der variantenreichen Serienfertigung in der Regel in sehr großen Mengen über mehrere Modellreihen hinweg eingesetzt. Der Einfluss der Änderung in einer Verbindung hat daher nur sehr begrenzten Einfluss auf die zum Einsatz kommende Gesamtmenge. Skaleneffekte fallen daher sehr gering aus und werden an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt.

Aufwendungen außerhalb der Montage

In den der Montage vorgelagerten Bereichen kommt es durch die jeweilige Verbindung ebenfalls zu Aufwendungen. Diese lassen sich wie eingangs beschrieben in drei Bereiche aufteilen:

- Presswerk/Gießerei
- Karosseriebau
- Lackiererei

Im Bereich des Presswerks und der Gießerei kommen überwiegend ur- und umformende Prozesse sowie Trennprozesse zum Einsatz. Entsprechend der in Kapitel 5.2 beschriebenen Klassifizierung der Elemente einer Verbindung erfolgt in dem Bereich des Presswerks und der Gießerei die Erzeugung der Hilfselemente wie Durchgangslöcher, Verdrehsicherungen oder Anschläge.

Die dabei entstehenden Aufwendungen sind, eine Berücksichtigung in der frühen Phase der Konstruktion vorausgesetzt, gering, da sich die Geometrie in die Werkzeuge für die Ur- und Umformprozesse integrieren lässt und im Prozess kein zusätzlicher Aufwand entsteht. Ist beispielsweise ein Durchgangsloch für die spätere Anbringung einer Schweißmutter an ein Stahlblech notwendig, so kann die Einbringung dieses als kostenneutral betrachtet werden, da es im selben Arbeitshub wie die restlichen Trennprozesse durchgeführt werden kann.

Zu beachten ist an dieser Stelle jedoch der Einfluss des Halbzeugs auf die entstehenden Aufwendungen. Ist das beschriebene Durchgangsloch in ein Bauteil aus 22MnB5 Stahl oder aus faserverstärktem Kunststoff einzubringen, so sind zusätzliche Prozessschritte wie Laser- oder Wasserstrahlschneiden beziehungsweise Bohren notwendig und damit in der Bestimmung der Aufwendungen zu berücksichtigen:

$$PA_i = PA_i^{Winitial} + PA_i^{Wlaufend} \quad (5.21)$$

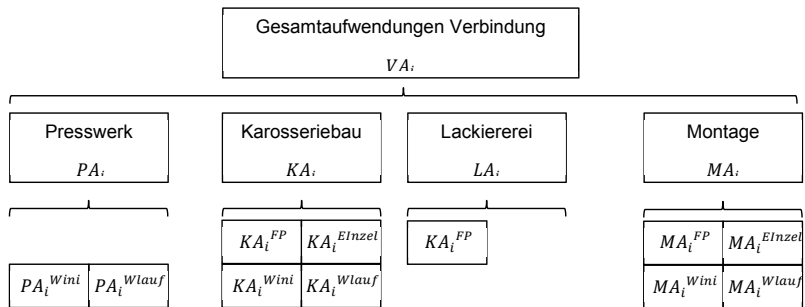
Die im Bereich des Karosseriebaus anfallenden Aufwendungen beziehen sich hauptsächlich auf das Fügen des Funktionselementes KA_i^{FP} wie Schweißmutter, Gewindebolzen oder Stanzbolzen. Dabei sind neben dem Fügeprozess analog zum Montageprozess die Werkzeugkosten ($KA_i^{Winitial} + KA_i^{Wlaufend}$) und die Kosten für das Verbindungselement $KA_i^{Einzelteil}$ zu betrachten. Abhängig vom Automatisierungsgrad fließt ebenfalls der lokale Fertigungslohn als Variable mit ein. In Hochlohnstandorten kann dieser jedoch vernachlässigt werden, da der Automatisierungsgrad in diesen Bereichen typischerweise über 90 % liegt.

$$KA_i = KA_i^{FP} + KA_i^{Winitial} + KA_i^{Wlaufend} + KA_i^{Einzelteil} \quad (5.22)$$

Die im Bereich der Lackiererei anfallenden Aufwendungen beziehen sich auf den Schutz der in den vorgelagerten Prozessen eingebrachten Hilfs- und Funktions-elemente vor den Beschichtungsmedien. Dazu werden Gewinde mit Lackschutzmuttern und Löcher mit Stopfen versehen. Diese in der Regel manuell ausgeführte Tätigkeit unterliegt ebenfalls dem Einfluss der lokalen Fertigungslöhne und ergibt sich zu:

$$LA_i = LFL \times LP_i \quad (5.23)$$

VA_i beschreibt die Gesamtaufwendungen einer Verbindung (vgl. Bild 5.15).



... A_i^{Wini} : Investkosten Betriebsmittel

... A_i^{Wlauf} : laufende Kosten Betriebsmittel

... A_i^{FP} : Fertigungsprozesskosten

... A_i^{Einzel} : Einzelteilkosten

Bild 5.15: Aufwendungen von lösbaren Verbindungen

Die beschriebene Methodik wird am Beispiel der Verschraubung eines Steuergeräts mit vier Schrauben in Schweißmuttern demonstriert. Die Schweißmuttern sind an einem Stahlblech angebracht und es besteht keine Anforderung an die elektrische Leitfähigkeit der Verbindungen.

Die Summe aller Aufwendungen beträgt demnach:

$$VA = PA + KA + LA + MA \quad (5.24)$$

Die Aufwendungen für den Lackschutz der Gewinde entfallen aufgrund o. g. Anforderungen an die Verbindung (keine elektrische Leitfähigkeit notwendig), womit sich die Aufwendungen wie folgt ergeben (vgl. Bild 5.16):

$$VA = PA + KA + MA \quad (5.25)$$

$$\text{mit } PA = PA^{Winitial} + PA^{Wlaufend}$$

$$KA = KA^{FP} + KA^{Einzelteil}$$

$$MA = MA^{FP} + MA^{Winitial} + MA^{Wlaufend} + MA^{Einzelteil}$$

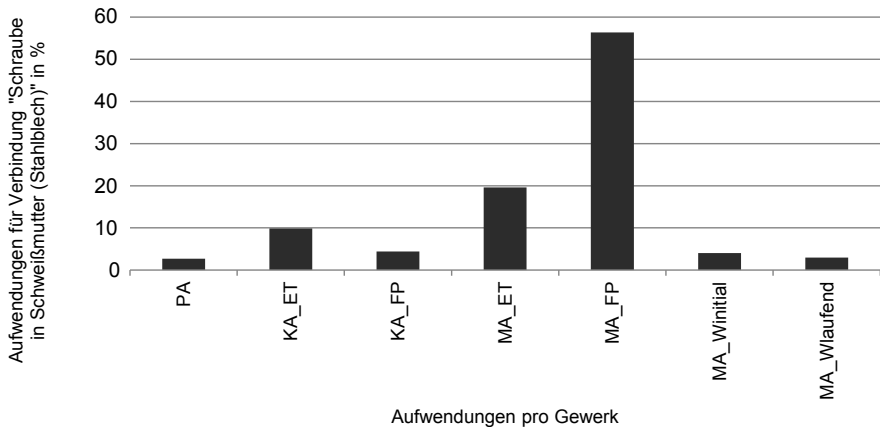


Bild 5.16: Ganzheitliche Betrachtung der Aufwendung für die Befestigung eines Bauteils mit Schrauben in Schweißmutter (Stahlblech)

Dabei entfallen 83 % der Aufwendungen auf die Montage, 14 % auf den Karosseriebau und 3 % auf das Presswerk. Innerhalb der Montage nehmen die aus der Fertigungszeit resultierenden Kosten den größten Teil in Anspruch (56 % der Gesamtaufwendungen). Diese Verteilung ist typisch für die zum Großteil manuell ausgeführten Prozesse der Montage und wird von den entsprechenden Fertigungspersonalkosten in Hochlohnländern bestimmt (in der Berechnung wurden Fertigungspersonalkosten von 40 €/h zugrunde gelegt). Bei der Ermittlung der Aufwendungen an einem Standort mit abweichenden Fertigungspersonalkosten verschiebt sich das Verhältnis entsprechend. Aufgrund der schrittweisen Ermittlung der Aufwendungen können standortspezifische Gegebenheiten transparent abgebildet werden und dienen als Grundlage für die entsprechende Auswahl der Verbindung.

Zur Vereinfachung der Anwendbarkeit werden die Aufwendungen für die einzelnen Verbindungstechniken als Fügeäquivalente ausgedrückt. Dabei handelt es sich um eine Normierung der Aufwendungen. Die Verbindungstechnik mit den geringsten Aufwendungen wird als 1 Fügeäquivalent definiert, alle weiteren Verbindungstechniken ergeben sich als Vielfache dieser.

Im Bereich der lösbaren Verbindungen fallen für die Befestigung an Bauteilen aus Stahl für die Verbindungstechnik „Clip in Loch“ die geringsten Aufwendungen an. Die Verbindungstechnik „Clip in Loch“ wird dementsprechend mit 1,0 Fügeäquivalenten bewertet. Die Aufwendungen für die Befestigung mit der Verbindungstechnik „Schraube in Schweißmutter“ sind um den Faktor 6,4 höher. Dementsprechend wird die Verbindungstechnik „Schraube in Schweißmutter“ mit 6,4 Fügeäquivalenten bewertet.

6 Anwendung der Methodik

Die Anwendung der Methodik erfordert die Implementierung in Form eines Assistenzsystems zur Benutzerführung und Sicherstellung der Berücksichtigung aller Arbeitsschritte (vgl. Kapitel 6.1) in der Arbeitsumgebung der Konstrukteure (vgl. Kapitel 6.2).

6.1 Architektur des Assistenzsystems

Zur Erstellung von Grobentwürfen für jedes Verbindungsszenario bedarf es einer rechnergestützten, automatisierten Lösung, da zur vollständigen Untersuchung des Lösungsraums mehrere hundert bis hin zu mehreren tausend Verbindungsszenarien erzeugt, bearbeitet und bewertet werden müssen (vgl. Kapitel 1.2).

Neben dem Umfang der zu betrachtenden Verbindungsszenarien haben die unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Auslegung der Verbindungstechnologien und die Anforderung der Erweiterbarkeit des Gesamtsystems Einfluss auf die Architektur des Assistenzsystems. Die Architektur orientiert sich an der eines Marktplatzes, bei welchem die Verbindungstechnologien von separaten Modulen repräsentiert werden (vgl. Kapitel 5.1.2). Definierte Schnittstellen ermöglichen dabei die Anbindung unterschiedlicher Arten von Modulen.

6.1.1 Marktplatz zur Erzeugung von Grobentwürfen

Für jedes der in Kapitel 5.3 ermittelten Verbindungsszenarien VS_i sind für alle zu berücksichtigenden lösbaren Verbindungstechniken VT_i Prinziplösungen zu erzeugen. Die theoretisch mögliche Anzahl der Prinziplösungen PL_{th} ergibt sich damit als

$$PL_{th} = VS_i \times VT_i \quad (6.1)$$

Zur Erzeugung der Prinziplösungen wird ein Assistenzsystem entwickelt, das entsprechend der in Kapitel 4.2 definierten Anforderungen einen modularen Aufbau aufweist. Dieser modulare Aufbau ermöglicht das getrennte Ablegen von Wissen zu den einzelnen Verbindungstechniken VT_i (vgl. Bild 6.1).

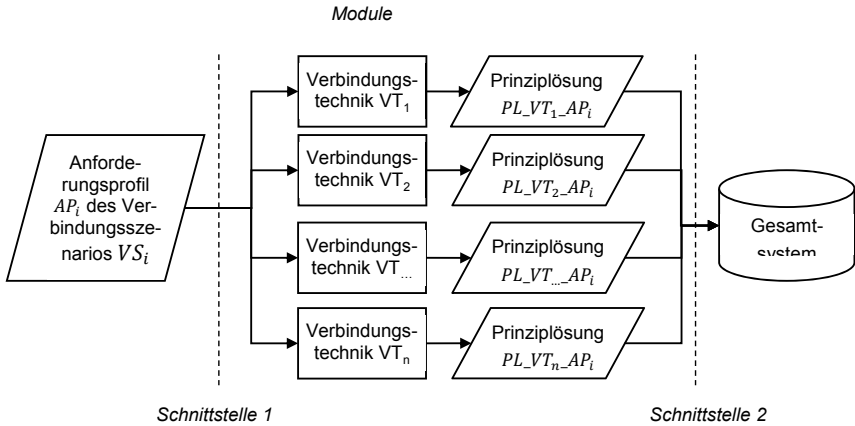
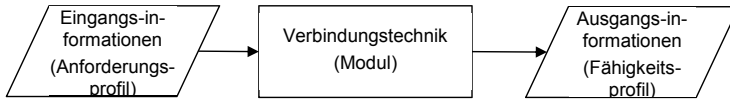


Bild 6.1: Marktplatz zur Ableitung von Verbindungen

Über eine standardisierte Schnittstelle wird das Anforderungsprofil AP_i des Verbindungsszenarios VS_i den Modulen zur Verfügung gestellt (vgl. Schnittstelle 1 in Bild 6.1). Damit können diese unabhängig voneinander und gemäß unterschiedlicher Methoden Prinziplösungen erzeugen. Diese werden an das Gesamtsystem zurückgegeben (vgl. Schnittstelle 2 in Bild 6.1) und mittels einer einheitlichen Systematik bewertet. Aus informationstechnischer Sicht entspricht der Aufbau einer Serviceorientierten Architektur (SOA), bei welcher Services verteilt vorliegen und von der übergeordneten Instanz applikationsspezifisch aufgerufen werden.

6.1.2 Schnittstellen zwischen den Modulen

Zur Gewährleistung des Datenaustauschs zwischen dem Gesamtsystem und den verteilten Modulen sind zwei Schnittstellen notwendig (vgl. Bild 6.1). Die erste Schnittstelle definiert die Übergabe der Verbindungsszenarien an die Module, die zweite Schnittstelle beschreibt die Rückgabe der Prinziplösungen der einzelnen Module an das Gesamtsystem. Dabei überführen die Module in einer Transferfunktion (vgl. Kapitel 3.2) die Eingangsinformationen (Anforderungsprofil) in eine Ausgangsinformation (Fähigkeitsprofil) (vgl. Bild 6.2).

**Bild 6.2:** Transferfunktion der Verbindungstechnik-Module

Dazu wurde ein kombiniertes Anforderungs- und Fähigkeitsprofil entwickelt, in welchem die qualitativen und quantitativen Kriterien zusammengefasst werden (vgl. Tabelle 6.1).

Kriterium	Anforderung	Fähigkeit
Qualitativ		
Material (Bauteil 1)	Stahl, Stahl hochfest, Aluminium, Profil (Aluminium), Guss, Kunststoff	Stahl, Stahl hochfest, Aluminium, Profil (Aluminium), Guss, Kunststoff
Material (Bauteil 2)	Stahl, Stahl hochfest, Aluminium, Profil (Aluminium), Guss, Kunststoff	Stahl, Stahl hochfest, Aluminium, Profil (Aluminium), Guss, Kunststoff
Dicht	NEIN; JA	NEIN; JA
Zerstörungsfrei lösbar	NEIN; JA	NEIN; JA
Einstellbar	NEIN; JA	NEIN; JA
Sichtbar	NEIN; JA	NEIN; JA
Einseitig zugänglich	NEIN; JA	NEIN; JA
Dokumentationspflichtig	NEIN; JA	NEIN; JA
Quantitativ		
F_A	$\geq x \text{ N}$	$x' \text{ N}$
F_Q	$\geq y \text{ N}$	$y' \text{ N}$
Positioniergenauigkeit	$\leq \pm z \text{ mm}$	$\pm z' \text{ mm}$

Tabelle 6.1: Anforderungskriterien und Fähigkeiten

Zur Sicherstellung des systemunabhängigen Datenaustauschs und der Kompatibilität mit unterschiedlichen Modulen wird eine XML-Datei erzeugt, in der sämtliche

relevanten Informationen enthalten sind. Im Folgenden werden die beiden Schnittstellen und deren Austauschdateien im Detail beschrieben.

Schnittstelle zu Modulen

Die Schnittstelle zu den Modulen dient der Übertragung der Verbindungsszenarien und deren Anforderungen an die Module. Diese Information liefert die Eingangsgröße für die Auslegung der Verbindungstechnik und damit die Erzeugung von Grobentwürfen. Neben der in den Verbindungsszenarien beschriebenen Anzahl der Verbindungspunkte und den auf die Verbindungspunkte wirkenden Kräfte sind allgemeine Anforderungen an die Verbindung wie Lösbarkeit, Positionierbarkeit und Dichtigkeit enthalten.

Informationstechnisch wird die das allgemeine Anforderungsprofil repräsentierende XML-Datei entsprechend der Anzahl der zu berücksichtigenden Verbindungsszenarien vervielfältigt und um die in die Verbindungsszenarien enthaltene Information ergänzt.

Schnittstelle zu Gesamtsystem

Die Schnittstelle zum Gesamtsystem dient der Übertragung der Prinziplösungen aus den einzelnen Modulen an das Gesamtsystem. Die darin enthaltenen Informationen repräsentieren ein Verbindungssystem sowie dessen Fähigkeiten. Dabei werden nur solche Lösungen zugelassen, welche alle im Anforderungsprofil beschriebenen Kriterien erfüllen.

6.1.3 Module zur Erzeugung von Grobentwürfen

Das Wissen zu den verschiedenen Montage-Technologien wird durch Module repräsentiert. Dieser Aufbau ermöglicht die einfache Wartung und Erweiterung des Gesamtsystems und reduziert dessen Komplexität, da die einzelnen Module keine Beziehung zueinander aufweisen.

Das Assistenzsystem kann drei Arten von Modulen umfassen, welche sich auf die zugrundeliegende Methode beziehen. Diese werden im Folgenden an je einem Beispiel beschrieben. Der Inhalt der Module ist nicht Teil der Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen, exemplarische Lösungsansätze werden jedoch zum Verständnis erläutert.

Regelbasiertes Modul

Regelbasierte Module repräsentieren lösbare Verbindungen, zu welchen es klar strukturierte Auslegungsvorschriften gibt. Dies sind beispielsweise Schraubverbindungen. In der VDI Richtlinie 2230 [VDI2230] werden 14 Rechenschritte zur Auslegung einer Schraubverbindung beschrieben (vgl. Tabelle 6.2).

Die in der Richtlinie beschriebenen Berechnungsschritte werden dazu implementiert und die entsprechenden Datenquellen integriert. Für die in einem Anforderungsprofil beschriebenen Geometrien und Betriebslasten ist es damit möglich, die passende Schraubverbindung zu ermitteln. Diese beschreibt neben den Verbindungselementen auch die Montageprozessgrößen und liefert damit die Grundlage für die Ableitung des Werkzeugs und die ganzheitliche Bewertung der Verbindung.

Rechenschritt	Beschreibung	Variable
Vorgaben		
R0	Nenn Durchmesser, Grenzabmessung	d, G
R1	Anziehungsfaktor	α_A
R2	Mindestklemmkraft	$F_{K\text{ erf}}$
Verspannungsdreieck		
R3	Aufteilung der Betriebskraft/Kraftverhältnis	F_{SA}, F_{PA}, Φ
R4	Vorspannkraftänderungen	$F_Z, \Delta F'_{V\text{ th}}$
R5	Mindestmontagevorspannkraft	$F_{M\text{ min}}$
R6	Maximalmontagevorspannkraft	$F_{M\text{ max}}$
Beanspruchungsfälle und Festigkeitsnachweise		
R7	Montagebeanspruchung	$\sigma_{red,M}, F_{M\text{ zul}}$
R8	Betriebsbeanspruchung	$\sigma_{red,B}, S_F$
R9	Schwingbeanspruchung	$\sigma_a, \sigma_{ab}, S_D$
R10	Flächenpressung	p_{max}, S_p
R11	Mindesteinschraubtiefe	$m_{eff\text{ min}}$
R12	Gleiten, Abscheren	$S_G, \tau_{Q\text{ max}}$
R13	Anziehdrehmoment	M_A

Tabelle 6.2: Berechnungsschritte zur Auslegung von Schraubverbindungen nach [VDI2230, S. 18 f.]

Regelbasierte Module können für alle Verbindungstechniken angewandt werden, für die gültige Konstruktionsrichtlinien existieren.

Fallbasiertes Modul

Fallbasierte Systeme vergleichen die Anforderungen eines zu lösenden Problems mit denen bereits gelöster Probleme. Ziel ist es, bereits erarbeitete Lösungen auf die neue Problemstellung zu übertragen.

Für die Auswahl von lösbaren Verbindungen kann das fallbasierte Schließen auf drei Ebenen stattfinden:

- Vergleich der zu befestigenden Bauteile mit bereits befestigten Bauteilen
- Vergleich der zu erwartenden Betriebslasten mit Betriebslasten bereits befestigter Bauteile
- Vergleich der zu befestigenden Bauteile mit alternativ zu befestigenden Bauteilen an der Verbindungsstelle

Einen Sonderfall nimmt der Vergleich von zu befestigenden Bauteilen mit bereits am gleichen Ort befestigten Bauteilen ein. Diese sehr auf die Montage ausgerichtete Betrachtung bezieht sich stark auf den sogenannten Anstattverbau, bei welchem in der Montage produktspezifisch entweder Bauteil A, B oder C verbaut wird. Zur Reduzierung der Komplexität (unterschiedliche Werkzeuge, Verbindungselemente) und damit auch der Anforderungen an die Montagemitarbeiter kann dabei eine einheitliche Verbindung verwendet werden, auch wenn sie die Anforderungen eines oder mehrerer Bauteile des Anstattverbaus übererfüllt.

Als Datenbasis für ein fallbasiertes System wurden alle Schraubverbindungen eines Produkts der variantenreichen Serienfertigung detailliert untersucht und systematisch beschrieben. Relevante Kriterien hierbei sind der Werkstoff, die Abmessungen und das Gewicht des zu befestigenden Bauteils sowie der Werkstoff des Fügepartners.

Als das zu befestigende Bauteil wird entsprechend der Definition in Kapitel 5.3.2 das Bauteil beschrieben, an welches die Betriebslast angreift. Kriterien für die Suche nach bestehenden Bauteilen sind damit übereinstimmende Werkstoffe von zu befestigendem Bauteil und Fügepartner sowie größere oder gleiche Abmessungen und Gewicht. Mittels einer Clusterung in Größen- oder Gewichtsklassen lassen sich für ganze Klassen Ideallösungen beschreiben und auf alle Verbindungsprobleme übertragen. Damit wird neben der Optimierung der einzelnen Verbindung auch die Optimierung des

Gesamtsystems erreicht, da die Standardisierung zu einer Reduzierung der Komplexität führt.

Blackbox-Modul

Blackbox-Module schützen Wissen und kommunizieren mit dem Gesamtsystem nur über die definierten Ein- und Ausgangsschnittstellen. Dies ermöglicht die Integration von sensiblem Spezialwissen, welches teilweise bei Zulieferern oder universitären Instituten vorliegt, ohne sie dieses offenlegen müssen.

Mit der Anbindung der Module als Services ist es möglich, die Blackbox-Module verteilt anzubinden und damit die Sicherheit des in diesen Modulen hinterlegten Wissens sicherzustellen. Für jedes Anforderungsprofil werden die Verbindungsszenarien an das Blackbox-Modul mit einer zeitlichen Gültigkeit weitergegeben. Diese legt fest, wie lange entsprechende, durch das Modul ermittelte Fähigkeitsprofile an das Gesamtsystem zurückgegeben werden können.

6.2 Implementierung in das Arbeitsumfeld der Konstrukteure

Das beschriebene Assistenzsystem kann als eigenständiges System oder direkt in der Arbeitsumgebung der Konstrukteure implementiert werden. Im Weiteren wird die Implementierung in ein CAD-System beschrieben, da dieses Vorteile bei der Verteilung des Systems an die Anwender bietet. Die direkte Verankerung hat weiter den Vorteil, dass Bauteilparameter wie Werkstoff und Materialdicke direkt aus dem CAD-System übernommen werden können und das System proaktiv in den Konstruktionsprozess eingreifen kann. So kann der Aufruf bestimmter Systemfunktionalitäten als Auslöser für Hinweise oder Abfragen genutzt werden. Sämtliche im Folgenden beschriebenen Umfänge wurden vom Autor im Rahmen der Arbeit eigenständig entwickelt. Allein die Implementierung in das CAD System wurde durch ein IT-Firma (Fa. SCALE GmbH vorgenommen).

Der Nutzer wird anhand von Masken durch die Auswahl der lösbaren Verbindung geführt. Dabei wird zwischen Ein- und Ausgabemasken unterschieden (vgl. Bild 6.3).

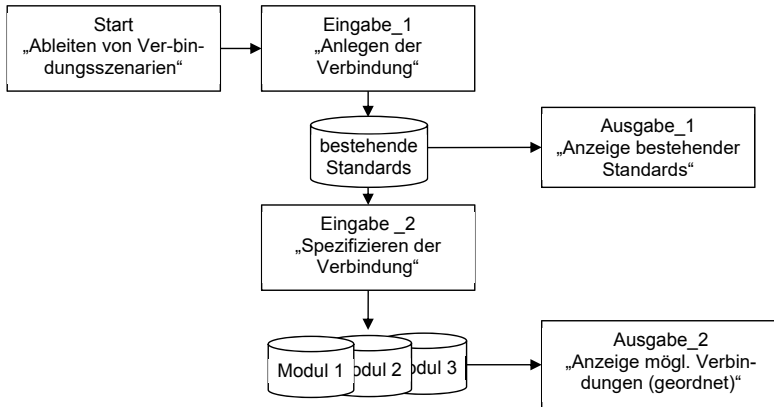


Bild 6.3: Ein- und Ausgabemasken des Assistenzsystems

Die Maske *Eingabe_1* dient dem Anlegen der Verbindung. Dazu werden Bezeichnung und Teilenummer der beiden zu verbindenden Bauteile abgefragt. Mittels einer Anbindung an das CAD/PDM System können weitere Informationen, wie der Werkstoff, automatisch ausgelesen werden. Neben den Bauteilen wird auch das zugehörige Fahrzeugprojekt bestimmt (vgl. Bild 6.4).



The screenshot shows a software window titled "VTM Prototype" with a close button in the top right corner. The main heading is "Anlegen einer Verbindung" (Creating a connection), accompanied by a gear icon. The form is organized into sections:

- Projekt (Project):** A group of dropdown menus for "Marke" (AU (Audi)), "Bodystyle" (1 (Stufenheck), 2 (Kombi)), "Segment" (4 (B)), "Variante", "Generation" (8 (8)), and "SE-Team".
- Bauteil 1 (Part 1):** Fields for "Teilenummer" (111.222.333._) and "Bezeichnung" (BEFESTIGUNGSLEISTE).
- Bauteil 2 (Part 2):** Fields for "Teilenummer" (444.555.666._) and "Bezeichnung" (VERSTAERKUNG HECKABSCHLUSST. OB).

At the bottom, the Audi logo and slogan "Audi Vorsprung durch Technik" are on the left, and navigation arrows are on the right.

Bild 6.4: Maske Eingabe_1

Zum Abgleich mit bestehenden Standards werden diese Informationen um Keywords und das zugehörige Simultaneous Engineering Team ergänzt. Diese Informationen dienen zur Prüfung der Übereinstimmung mit den in den Standards hinterlegten Informationen. Das Ergebnis der Prüfung wird dem Benutzer in der Maske *Ausgabe_1* zur Verfügung gestellt. Für relevante Standards werden Kurz- und Langtext, Anhang und Abbildung visualisiert. Die Geometriedaten sind in Form von Features in einem zentralen Speicher hinterlegt und können direkt in die Konstruktion übernommen werden. Damit wird die Berücksichtigung bestehender Standards sichergestellt. Ein zusätzlicher positiver Aspekt ist die Reduktion des Aufwands für die Informationsbeschaffung, da die Suche nach Standards in einer separaten Datenbank entfällt.

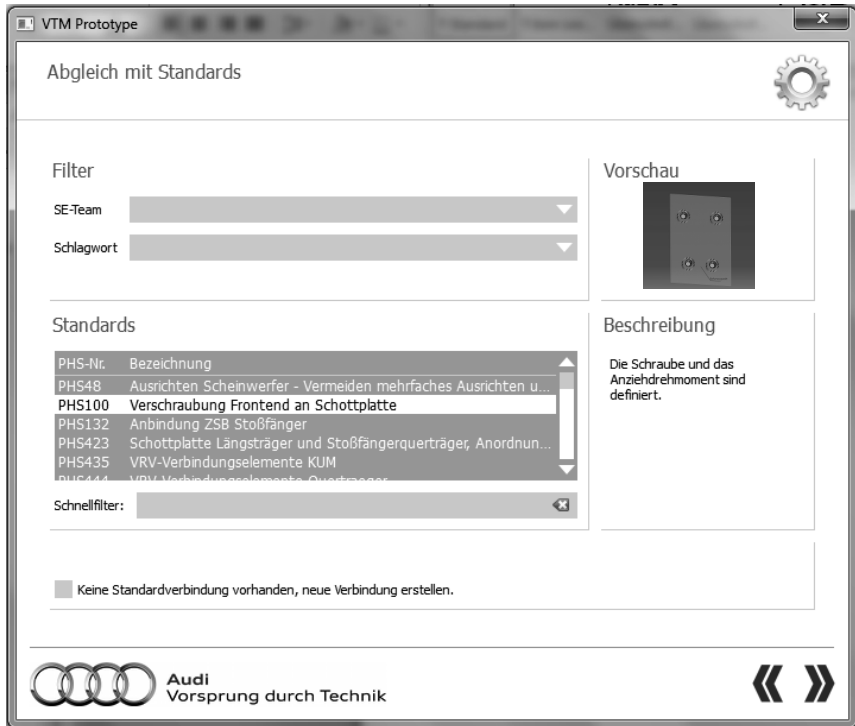


Bild 6.5: Maske Ausgabe_1

Besteht für eine Verbindung kein gültiger Standard erfolgt die assistierte Auswahl der Verbindungstechnik. Dazu werden mit der Maske *Eingabe_2* die Informationen zur Verbindung weiter verfeinert, sodass das Anforderungsprofil (vgl. Kapitel 5.3) vollständig an die Module übergeben werden kann. Dazu werden die Werkstoffe der zu verbindenden Bauteile und deren Gewichte ermittelt (vgl. Bild 6.6). Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Implementierung einer separaten Maske *Ausgabe_2* verzichtet. Die Ergebnisse werden direkt in der Maske *Eingabe_2* angezeigt.



Bild 6.6: Maske Eingabe_2/Ausgabe_2

Im unteren Teil der Maske *Eingabe_2/Ausgabe_2* findet sich das Ergebnis aus dem Fallbasierten Schließen für die zu verbindenden Bauteile. Dabei werden alle dem System bekannten Verbindungen auf Ähnlichkeit mit dem aktuellen Verbindungsproblem untersucht und die drei wirtschaftlichsten Lösungen werden dem Konstrukteur visualisiert. Als Vergleichsgröße werden die in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Fügeäquivalente verwendet. Weitere Informationen und Bilder zu diesen Lösungen erhält der Konstrukteur per Mausklick auf die entsprechenden Punkte.

Aufbauend auf der Auswahl der Verbindungstechnik wird die weitere Ausgestaltung der Verbindung unterstützt. Dazu wurde eine weitere Maske *Eingabe_3* konzipiert, in welcher die Verbindungselemente und deren Position eingegeben werden können (vgl. Bild 6.7).

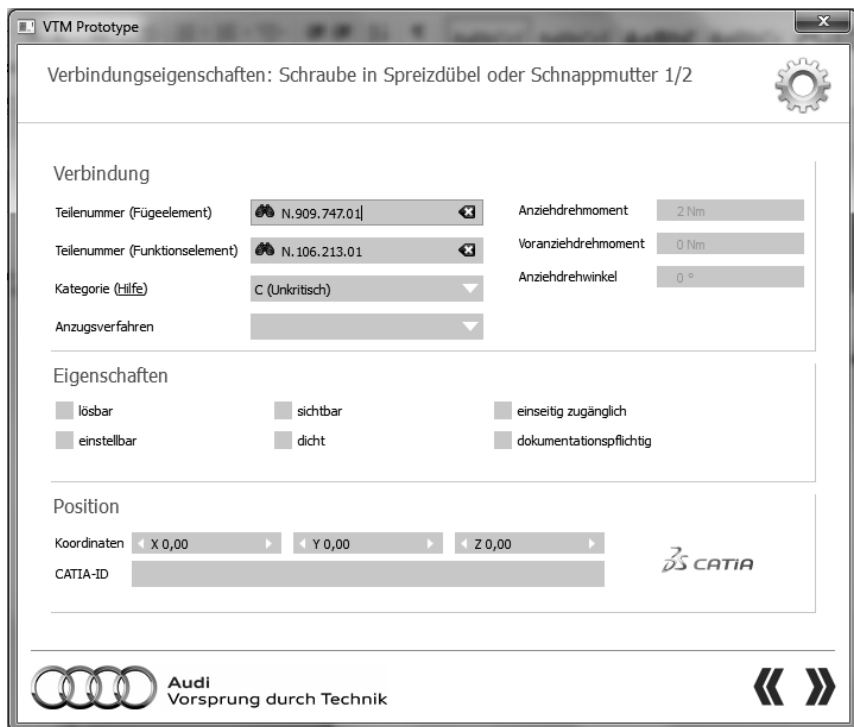


Bild 6.7: Detaillierung der Verbindung Eingabe_3

Dazu sind die bekannten Verbindungselemente in einer Datenbank hinterlegt. Entsprechend der gewählten Verbindungstechnik werden alle für diese verfügbaren Verbindungselemente visualisiert.

Neben den Verbindungselementen werden Prozessparameter und Metainformationen wie die Kategorie der Verbindung abgefragt (Auswirkung bei Ausfall der Verbindung). Diese Informationen dienen der Ableitung der entsprechenden Produktionsprozesse und ermöglichen die vollständige Beschreibung der Verbindung.

Abschließend werden alle Informationen in ein XML-Format konvertiert und an die zentrale Instanz verschickt (vgl. Bild 6.8). Diese Vorgehensweise unterstützt neben der Auswahl auch die Auslegung der Verbindung durch die Bereitstellung von Informationen.

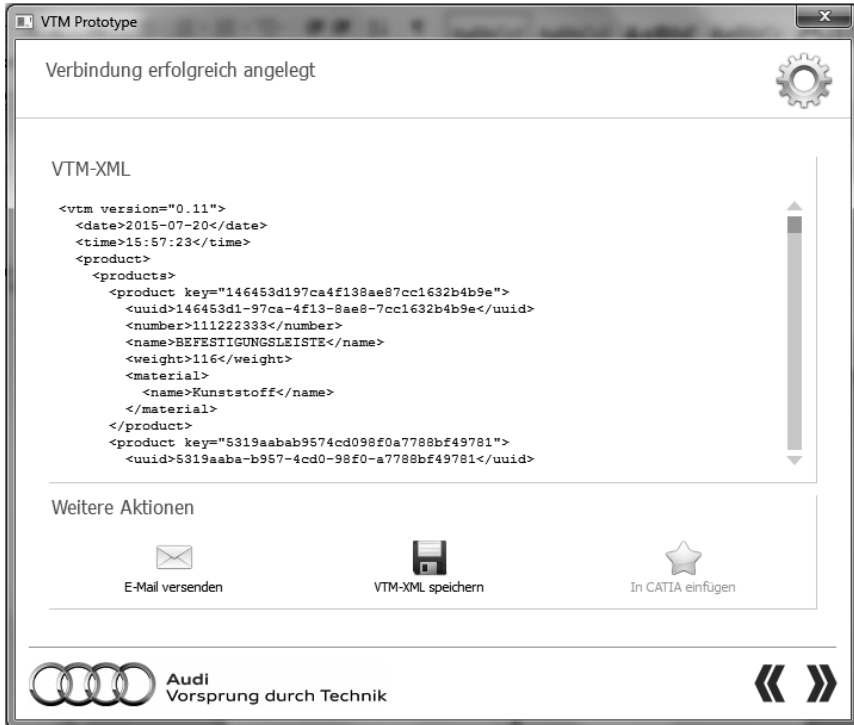


Bild 6.8: Konsolidierung der Verbindungsinformationen

Die Konsolidierung von Produkt- und Prozessinformationen ermöglicht die ganzheitliche Beschreibung der Verbindung und liefert die Basis für weitere Auswertungen. Die auf diesem Weg erzeugten Verbindungen lassen sich entweder als Liste oder als Graph visualisieren (vgl. Bild 6.9).

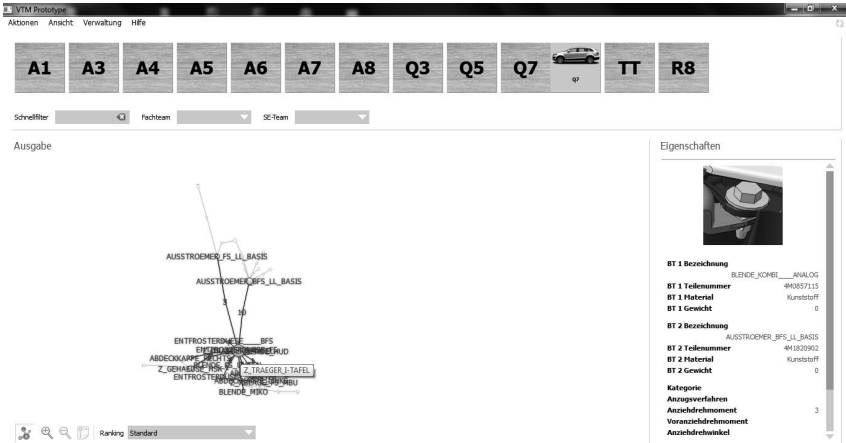


Bild 6.9: Integrierte Produkt- und Prozessdokumentation als Graph

Vorteil der Implementierung ist die einfache und eindeutige Schnittstelle zum Nutzer. Mit dem schrittweisen Ablauf wird sichergestellt, dass nur die für den nächsten Arbeitsschritt notwendigen Informationen abgefragt werden und der Zeitbedarf für den Konstrukteur minimiert wird. Durch die Trennung zwischen Frontend (Eingabe- und Ausgabemasken) und Backend (Datenbank und Module) können Anpassungen durchgeführt werden, ohne dass der Nutzer unmittelbar davon betroffen ist. Wird beispielsweise eine neue Verbindungstechnik integriert, so beeinflusst diese den Ablauf der Auswahl der Verbindungstechnik aus Sicht des Nutzers in keiner Weise. Ist die mittels der neuen Verbindungstechnik ermittelte Lösung den bestehenden in Bezug auf das Kriterium der Wirtschaftlichkeit überlegen, so wird diese dem Nutzer jedoch in der abschließenden Maske *Ausgabe_2* empfohlen.

7 Evaluation

Die Evaluation der Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung orientiert sich an der wissenschaftstheoretischen Einordnung der Arbeit zu den angewandten Realwissenschaften. Entsprechend der in Kapitel 1.5 beschriebenen Konzeption der Evaluation wird nicht nur die Durchführbarkeit der Methodik untersucht, sondern vielmehr deren Nutzen im Verwendungszusammenhang. Mit der Methodik wird die Verbesserung der Auswahl von lösbaren Verbindungen in Bezug auf die aus einer Verbindung resultierenden Kosten in der Produktion angestrebt (vgl. Kapitel 4.1). Zur Validierung des Nutzens werden die aus den Verbindungen eines bestehenden Produkts entstehenden Aufwendungen untersucht. Zuerst werden die Aufwendungen der Verbindungen ermittelt, welche ohne die Methodik entwickelt wurden. Dieselben Verbindungen werden mit der Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung überarbeitet. Die Bestimmung der Differenz zwischen den Aufwendungen aus den Verbindungen, welche ohne die Methodik entwickelt wurden, und denen, welche mit der Methodik entwickelt wurden, quantifiziert den Nutzen (vgl. Bild 7.1).

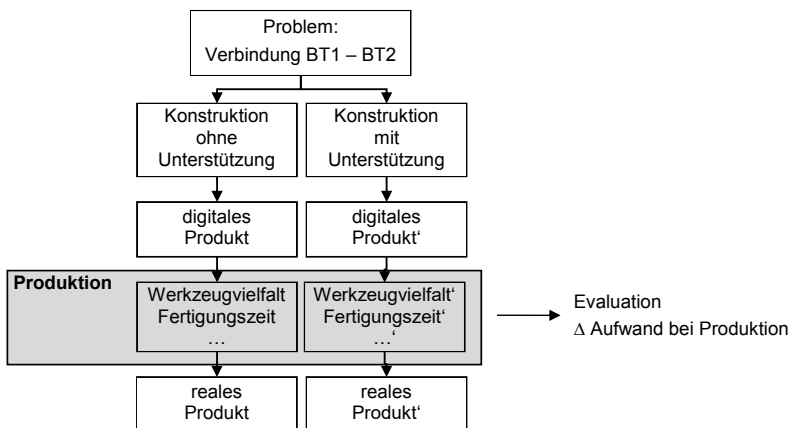


Bild 7.1: Evaluierung des Assistenzsystems durch Vergleich mit Ist-Zustand der Produktentwicklung

Als Untersuchungsgegenstand werden die Schraubverbindungen eines Mittelklassefahrzeugs verwendet. Dazu werden die Aufwendungen der 1.384 Verschraubungen, die sich auf 665 Schraubfälle (vgl. Kapitel 2.1.1) verteilen, ganzheitlich bewertet. Mittels der Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen werden Alternativen für diese Schraubverbindungen ermittelt und deren Aufwendungen bewertet. Für die Evaluation kommt das in Kapitel 6.2 beschriebene Modul zum fallbasierten Schließen zum Einsatz. Abschließend werden die Abweichungen zu einer Gesamtsumme addiert und damit die Verbesserung des Verwendungszusammenhangs quantifiziert.

7.1 Aufwendungen aus Schraubverbindungen ohne Assistenzsystem

Grundlage für die Bewertung ist die in Kapitel 5.4 beschriebene Methode zur Erfassung der Aufwendungen. Danach ergeben sich die Aufwendungen für die einzelnen Schraubverbindungen aus den einzelnen Gewerken.

Zur monetären Quantifizierung der Fertigungszeit wird ein für Deutschland gängiger Kostensatz von 40 €/h verwendet. Zum Schutz von unternehmensinternen Informationen wird das Ergebnis der monetären Bewertung in Geldeinheiten (GE) ausgedrückt. Dazu wird für die aufwendigste Verbindung ein Bedarf von 100 GE angenommen und die übrigen Verbindungen dazu ins Verhältnis gesetzt.

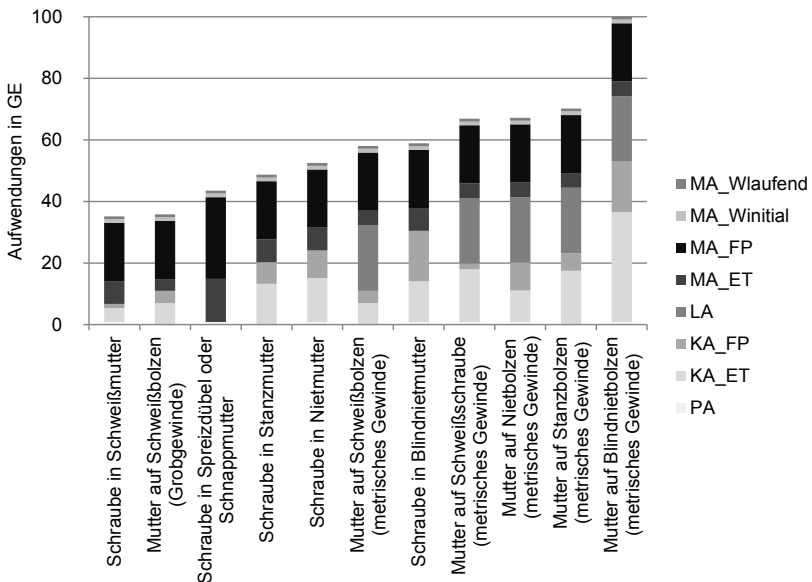
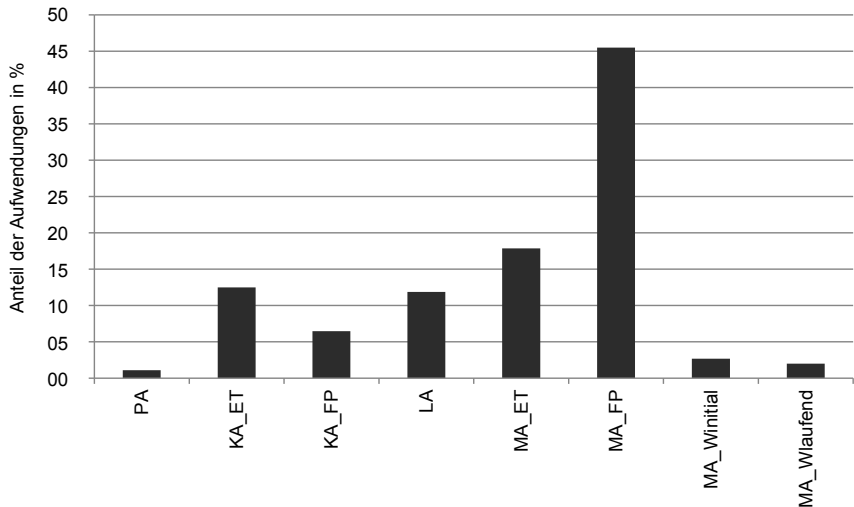


Bild 7.2: Aufwendungen für Schraubverbindungen

Mittels der in Kapitel 5.4.1 gezeigten Bewertung der Aufwendung der unterschiedlichen Schraubverbindungen werden die Verbindungen des untersuchten Fahrzeuges bewertet. Dazu werden für die 665 Schraubfälle die Art der Schraubverbindung und Anzahl der Verbindungspunkte ermittelt und mit den Aufwendungen multipliziert. Ergebnis sind die Aufwendungen für die einzelnen Gewerke, welche sich zu einer Gesamtsumme von 70.526 GE zusammenführen lassen (vgl. Bild 7.2).

Bild 7.3: Gesamtaufwendungen für untersuchtes Fahrzeug



Auffällig ist der hohe Anteil der Montage (69 %) an den Gesamtkosten im Verhältnis zu den Aufwendungen im Karosseriebau (19 %), der Lackiererei (11 %) und dem Presswerk (1 %) (vgl. Bild 7.3). Die detaillierte Untersuchung der Aufwendungen in der Montage zeigt, dass 45 % aus den manuellen Fertigungsprozessen resultieren. Aufgrund der standardisierten Ermittlung der Fertigungszeiten nach REFA oder MTM können diese Aufwendungen (bei konstanten Fertigungslöhnen) allein durch die konstruktive Änderung der Verbindungstechnik verringert werden.

Die Gesamtsumme liefert die Vergleichsbasis zur Bewertung des Nutzens der Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung.

7.2 Aufwendungen aus Schraubverbindungen mit Assistenzsystem

Zur Bewertung der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch den Einsatz der Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung wurden die in Kapitel 7.1 analysierten Verbindungen eines aktuellen Fahrzeuges mit dem Assistenzsystem überprüft. Dazu wurden die zu verbindenden Bauteile und die Anforderungen an die Verbindung spezifiziert und unter Nutzung des fallbasierten Moduls alternative Lösungen ermittelt.

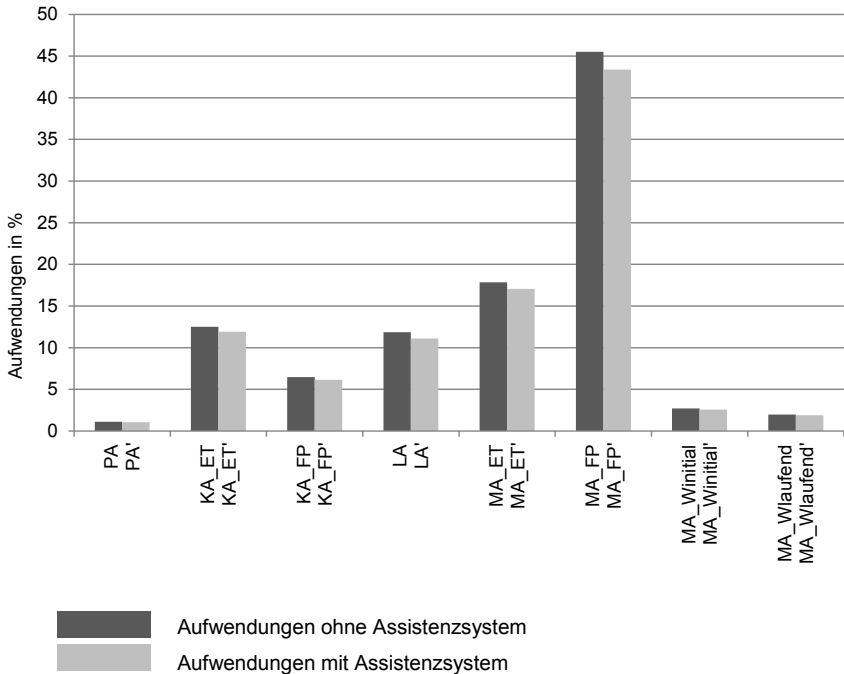


Bild 7.4: Verbesserte Gesamtaufwendungen für das untersuchte Fahrzeugprojekt

Für 42 der 665 Schraubfälle konnten Lösungen ermittelt werden, welche wirtschaftlicher als die bestehenden Lösungen sind. Damit ergeben sich die Gesamtaufwendungen von 66.837 GE (vgl. Bild 7.4). Die detaillierte Betrachtung der Abweichungen (vgl. Bild 7.5) zeigt, dass sich die größten Einsparungen im Bereich des Fügens in der Montage ergeben. Darüber hinaus verbessert sich jedoch die Wirtschaftlichkeit auch in allen übrigen Bereichen.

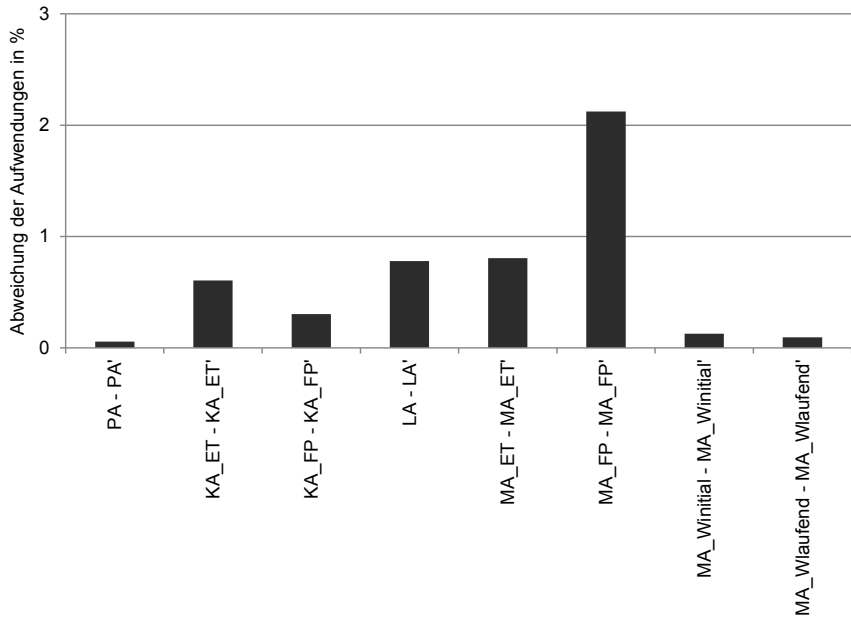


Bild 7.5: Deltabetrachtung der Aufwendungen für das untersuchte Fahrzeugprojekt

7.3 Verbesserung des Verwendungszusammenhangs

Durch den Einsatz der Methodik konnten bei dem untersuchten Fahrzeug für 42 Verbindungen Alternativlösungen mit verbesserter Wirtschaftlichkeit ermittelt werden. Die Einsparungen von 5,2 % der Gesamtaufwendungen verteilen sich dabei gleichmäßig auf die verschiedenen Gewerke. Die größten Einsparungen können mit 64 % im Bereich der Montage realisiert werden, gefolgt vom Karosseriebau (18 %) und der Lackiererei (15 %). Die restlichen Einsparungen (3 %) entfallen auf das Presswerk.

Mit dem Einsatz der Methodik an einem realen Projekt der variantenreichen Serienfertigung wurde der Nutzen gezeigt. Das Ziel von 5 – 10 % Einsparung wurde knapp erreicht. Jedoch ist zu beachten, dass die Methodik lediglich auf Schraubverbindungen angewandt wurde. Die Ausweitung auf weitere lösbare Verbindungen wie Schnappverbindungen bietet zusätzliches Potenzial.

8 Zusammenfassung

Mit der Methodik zur Auswahl von lösbaren Verbindungen in der variantenreichen Serienfertigung wurde eine Vorgehensweise beschrieben, welche die Auswahl und Auslegung von Verbindungen in der Entwurfsphase unterstützt.

Die variantenreiche Serienfertigung ist aufgrund der Vielfalt und Veränderlichkeit der zu produzierenden Produkte von einer hohen Komplexität gekennzeichnet. Aufgrund der großen Stückzahlen haben die in der Entwicklungsphase getroffenen Entscheidungen einen bedeutenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Produkterstellung und des Unternehmens. Eine Schraubverbindung beispielsweise verursacht für ein Volumenfahrzeug über der gesamten Laufzeit Kosten in der Produktion von mehr als einer halben Million Euro. Daher kommt der Auswahl der technisch und wirtschaftlich optimalen Verbindung eine große Bedeutung zu.

Die Herausforderung bei der Auswahl von lösbaren Verbindungen ist die Menge der zu berücksichtigenden Werkstoffe und Verbindungstechniken sowie die wirtschaftliche Bewertung der unterschiedlichen Konzepte. Für die Befestigung eines Steuergeräts an einem Stahlbauteil sind beispielsweise mehr als 10.000 unterschiedliche Verbindungen möglich. Die Berücksichtigung der verschiedenen Alternativen erfordert eine methodische Unterstützung des Konstruktionsprozesses.

Grundannahme ist die Beschreibung einer Verbindung als ein Produkt und Übertragung von Vorgehensweisen aus dem Produktentwicklungsprozess auf die Entwicklung der Verbindung. Wie für ein Produkt werden zu Beginn die Anforderungen an die Verbindung in Form einer Anforderungsliste beziehungsweise eines Anforderungsprofils hinterlegt. Rechnergestützt und applikationsspezifisch werden für diese technisch mögliche Lösungen ermittelt und wirtschaftlich bewertet. Dem Konstrukteur wird eine geordnete Übersicht mit all diesen Lösungen zur Verfügung gestellt, aus welcher er eine Lösung featuregestützt in die Konstruktion übertragen kann. Die vollständige Dokumentation von Produkt- und Prozessinformationen in einem integrierten Modell schließt die Gestaltung der Verbindung ab.

Von bestehenden Unterstützungssystemen bei der Auswahl und Auslegung von Verbindungen grenzt sich die Methodik einerseits durch den Detaillierungsgrad und andererseits durch die ganzheitliche wirtschaftliche Bewertung der Lösungen, wie sie in der variantenreichen Serienfertigung notwendig ist, ab. Der Detaillierungsgrad übersteigt

den der bestehenden Systeme, da nicht aus einer Liste aller Verbindungen die möglichen herausgefiltert werden (top-down), sondern für jede Verbindung applikationsspezifisch die möglichen Verbindungen errechnet werden (bottom-up). Bei der Top-down-Methode muss eine Lösung auf unterschiedliche Verbindungsprobleme anwendbar sein, was eine allgemeine Beschreibung der Charakteristika erfordert. Dahingegen können mit der Bottom-up-Vorgehensweise sämtliche Charakteristika der zu verbindenden Bauteile vollständig berücksichtigt werden. Damit ist es möglich, nicht nur Verbindungstechniken untereinander zu vergleichen (z. B. Schraube oder Schnappverbindung), sondern auch Alternativen innerhalb einer Verbindungstechnik zu untersuchen (z. B. drei Schrauben M6 oder vier Schrauben M5).

Ein weiterer Vorteil der Methodik ist die Berücksichtigung unterschiedlicher Informationsquellen und -arten. Der modulare Aufbau beinhaltet neben fallbasierten und regelbasierten Modulen die Möglichkeit, Wissen in gekapselter Form einzubeziehen. Dies ermöglicht die Berücksichtigung von externen Informationsquellen, ohne dass das bestehende System angepasst werden muss. Dazu bietet der modulare Aufbau die Möglichkeit der einfachen Erweiterbarkeit zur Berücksichtigung neuer Werkstoffe und Verbindungen.

Die Methodik wurde an den Schraubverbindungen eines Fahrzeuges der variantenreichen Serienfertigung validiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Anwendung der Methodik eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit um 5,2 % ermöglicht.

9 Ausblick

Zukünftige Arbeiten können drei Aspekte adressieren: Die Integration weiterer lösbarer und unlösbarer Verbindungstechniken, das Hinzufügen von weiteren Zielgrößen neben der Wirtschaftlichkeit (z. B. Leichtbau) sowie die Berücksichtigung von Verbindungssystemen mit mehr als einer Verbindungstechnik.

In der vorliegenden Arbeit wurden lösbare Verbindungen betrachtet. Diese finden sich in der variantenreichen Serienfertigung vorrangig im Bereich der Montage. Im vorgelegerten Karosseriebau kommen hauptsächlich thermische und mechanische Verbindungen wie Widerstandpunktschweißen, Laserstrahlschweißen und Stanznieten zum Einsatz. Beim Übertragen der Methodik von den lösbaren Verbindungen auf die bedingt lösbaeren und unlösbaeren Verbindungen ist insbesondere die Anforderungsdefinition zu bewerten. Hauptaspekte sind hierbei die aus dem hohen Automatisierungsgrad resultierenden Aufwendungen und die fertigungstechnischen Randbedingungen, wie beispielsweise Einschränkungen bei der Fügerrichtung.

Die Auswahl der Verbindung erfolgt in der vorliegenden Arbeit allein nach dem Kriterium der Wirtschaftlichkeit (die Funktionalität der Verbindung vorausgesetzt). Die Hinzunahme weiterer Faktoren wie Leichtbau oder Recyclefähigkeit führt zu einem multi-kriteriellen Problem und bedarf ggf. der kontextabhängigen Gewichtung der Zielgrößen.

Der Einsatz von Verbindungssystemen mit mehr als einer Verbindungstechnik kann in Bezug auf die Aufwendungen Vorteile bringen. So sind bereits heute Mischsysteme bekannt, bei welchen ein Bauteil an zwei Verbindungsstellen eingeschoben und an der dritten Verbindungsstelle mit einem Verbindungselement fixiert wird. Die Berücksichtigung solcher Verbindungen in der Methodik kann hinsichtlich der gewählten Zielgröße weitere Vorteile bringen.

Des Weiteren werden sich aus dem Einsatz der Methodik in der betrieblichen Praxis weiterführende Fragestellungen ergeben. Dabei ist zu betrachten, wie sich die unterschiedlichen Sichtweisen und Bedürfnisse der Prozessbeteiligten abbilden lassen.

Literaturverzeichnis

- [ALBERS11] Albers, A.; Oerding, J.; Alink, T.: Abstract objectives can become more tangible with the contact and channel model (C&CM). In: Bernard, A. (Hrsg): *Global Product Development: Proceedings of the 20th CIRP Design Conference*, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France, 19th–21st April 2010, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, S. 203–213.
- [ALICKE05] Alicke, K.: *Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken: Unternehmensübergreifendes Supply Chain Management*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [ALINK10] Alink, T.: *Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz*, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2010.
- [ALTSCHULLER98] Altschuller, G.: *Erfinden: Wege zur Lösung technischer Probleme*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1998.
- [ANDERSON08] Anderson, D.: *Design for manufacturability & concurrent engineering: How to design for low cost, design in high quality, design for lean manufacture, and design quickly for fast production*. Cambria: CIM Press, 2008.
- [ASHBY56] Ashby, W.: *An introduction to cybernetics*. London: Chapman & Hall Ltd, 1956.
- [ASHBY04] Ashby, M.; Brechet, Y.; Cebon, D.; Salvo, L.: Selection strategies for materials and processes. In: *Materials & Design* 25, 2004, S. 51–67.
- [BAUER91] Bauer, C.-O.; Althof, W.: *Handbuch der Verbindungstechnik*. München, Wien: Hanser, 1991.
- [BAUER09] Bauer, S.: *Entwicklung eines Werkzeugs zur Unterstützung multi-kriterieller Entscheidungen im Kontext des Design for X*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2009.
- [BENDER04] Bender, B.: *Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategien in frühen Phasen der Produktentwicklung*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2004.
- [BINZ11] Binz, H.; Keller, A.; Kratzer, M.; Messerle, M.; Roth, D.: Increasing Effectiveness and Efficiency of Product Development – A Challenge for Design Methodologies and Knowledge Management. In: Birkhofer, H. (Hrsg): *The Future of Design Methodology*, London: Springer-Verlag, 2011, S. 79–90.
- [BINZ14] Binz, H.: Skript Konstruktionslehre II, IKTD, Universität Stuttgart, 2014.

- [BLUEZE10] Blueze, T.; Baets, P. de; Detand, J.: Design to connect. In: *Sustainable Construction and Design* 1, 2010, S. 90–93.
- [BRECHER05] Brecher, C.; Weck, M.; Schuh, G.; Phornprapha, M.; Yamasaki, Y.: Datenmanagement im Entwicklungsprozess. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg): *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*, Berlin: Springer, 2005, S. 54–74.
- [BROCKHAUS90] Brockhaus: *dtv-Lexikon: In 24 Bänden.*, München: Dt. Taschenbuch-Verlag, 1990.
- [CHARLES99] Charles, J.; Crane, F. A. A.; Furness, J. A. G.: *Selection and use of engineering materials*. 3. Auflage, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [DELCHAMBRE96] Delchambre, A. (Hrsg): *CAD method for industrial assembly: Concurrent design of products, equipments, and control systems*. Chichester: Wiley, 1996.
- [DIETER86] Dieter, G.: *Engineering design: A materials and processing approach*. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [DIN323 Blatt 1] DIN 323 Blatt 1: *Normzahlen und Normzahlreihen*, Berlin: Beuth Vertrieb GmbH, 1974.
- [EHRENSPIEL92] Ehrlenspiel, K.; Danner, S.; Schlüter, A.: Verbindungsgestaltung für montagegerechte Produkte. In: *Montage und Demontage: Aspekte erfolgreicher Produktkonstruktion*, Tagung Fellbach, 11. und 12. November 1992. VDI-Berichte, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992, S. 179–206.
- [EHRENSPIEL07] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. VDI-Buch. 6. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [EHRENSPIEL09] Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 4. Auflage, München, Wien: Hanser-Verlag, 2009.
- [ESAWI04] Esawi, A.; Ashby, M.: Computer-based selection of joining processes: methods, software and case studies. In: *Materials & Design* 25, 2004, S. 555–564.
- [ESPIG06] Espig, M.; Johannaber, M.; Wohlecker, R.: Simulation der Verbrauchsverbesserung durch Gewichtsreduzierung in Pkw. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 2006, S. 1086–1090.
- [EVERSHEIM02] Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002.
- [EVERSHEIM05a] Eversheim, W.; Schuh, G.; Assmus, D.: Einleitung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg): *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. Berlin: Springer, 2005, S. 1–3.
- [EVERSHEIM05b] Eversheim, W.; Schuh, G.; Assmus, D.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg): *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. VDI, Berlin: Springer, 2005, S. 5–20.

- [FARAG89] Farag, M.: *Selection of materials and manufacturing processes for engineering design*. New York: Prentice Hall, 1989.
- [FISHER95] Fisher, M.; Jain, A.; MacDuffie, J.: Strategies for product variety: Lessons from the auto industry. In: Bowman, E. H.; Kogut, B. M. (Hrsg): *Redesigning the firm*, New York: Oxford University Press, 1995, S. 116–154.
- [FISHER99] Fisher, M.; Ittner, C.: The Impact of Product Variety on Automobile Assembly Operations: Empirical Evidence and Simulation Analysis. In: *Management Science*, 1999, S. 771–786.
- [FKA02] FKA: *Lightweight Potential of an Aluminum Intensive Vehicle*. Aachen, 2002.
- [FRIEDRICH13] Friedrich, H. E. (Hrsg): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. ATZ/MTZ-Fachbuch, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [GEIS08] Geis, C.; Bierhals, R.; Schuster, I.; Badke-Schaub, P.; Birkhofer, H.: Methods in practice-A study on requirements for development and transfer of design methods. In: *Proceedings of the International Design Conference*, Dubrovnik, Croatia, 2008, S. 369–376.
- [GHASSEMIEH11] Ghassemieh, E.: Materials in automotive application, state of the art and prospects. In: Chiaberge, M.: *New Trends and Developments in Automotive Industry*, InTech, 2011.
- [GIACHETTI98] Giachetti, R.: A decision support system for material and manufacturing process selection. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 9, 1998, S. 265–276.
- [GRABOWSKI87] Grabowski, H.; Benz, H.: Suchsystem zur Informationsfindung. In: *Rechnerunterstützte Angebotsbearbeitung: Voraussetzungen, Organisation und Nutzung von Informationen*. Tagung, Karlsruhe 1987. VDI Berichte, Düsseldorf: VDI Verlag, 1987, S. 75–100.
- [GROLL08] Groll, M.: *Interconnection based product and process documentation*, University of Twente, Dissertation, 2008.
- [HAGE09] Hage, M.; Schulz, R.: Verbindungstechnik im Multi-Material-Design künftiger Leichtbau-Karosserien. In: *Lightweight Design*, 2009, S. 42–45.
- [HOLBERY06] Holbery, J.; Houston, D.: Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. In: *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society* 58, 2006, S. 80–86.
- [JÄNTSCH07] Jäntsich, J.; Birkhofer, H.: Imparting design methods with the strategies of experts. In: *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED07)*, 2007, S. 269–270.
- [KLETT09] Klett, J.: *Systematic Design of Connections under Consideration of Assembly and Disassembly related Properties*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2009.

- [KOHNO5] Kohn, W.: Statistik: *Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Statistik und ihre Anwendungen*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2005.
- [LEBACQ02] LeBacq, C.; Brechet, Y.; Shercliff, H.; Jeggy, T.; Salvo, L.: Selection of joining methods in mechanical design. In: *Materials & Design* 23, 2002, S. 405–416.
- [L'EGLISE01] L'Eglise, T.; Lit, P. de; Fouda, P.: A multicriteria decision-aid system for joining process selection. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP2001): Assembly and Disassembly in the Twenty-first Century*. Fukuoka, Japan, 2001, S. 324–329.
- [LE-WANDOWSKI00] Lewandowski, S.; Lewandowski, A.; Herzberg, J.: *Integriertes Teilemanagement in 3D-Konstruktionsumgebungen – Prozessorientierte Kopplung von ERP/PPS-, EDM/PDM-, CAD- und Normteilsystemen am Fallbeispiel des Adtranz-Konzerns*. VDI-Berichte Nr. 1569. Düsseldorf, 2000.
- [LEWIS90] Lewis, G.: *Selection of engineering materials*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990.
- [LINDEMANN06] Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M.: *Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. VDI-Buch, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [LÓPEZ-MESA11] López-Mesa, B.; Bylund, N.: A study of the use of concept selection methods from inside a company. In: *Research in Engineering Design* 22, 2011, S. 7–27.
- [LOTTER06] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.; Hannover, U.: *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [LOVATT98a] Lovatt, A.; Shercliff, H.: Manufacturing process selection in engineering design. Part 1: the role of process selection. In: *Materials & Design* 19, 1998, S. 205–215.
- [LOVATT98b] Lovatt, A.; Shercliff, H.: Manufacturing process selection in engineering design. Part 2: a methodology for creating task-based process selection procedures. In: *Materials & Design* 19, 1998, S. 217–230.
- [MACDUFFIE96] MacDuffie, J.; Sethuraman, K.; Fisher, M.: Product Variety and Manufacturing Performance: Evidence from the International Automotive Assembly Plant Study. In: *Management Science* 42, 1996, S. 350–369.
- [MAREE99] Maree, J.-F.; Raucant, B.; Spineux, A.: Selection of assembly modes and techniques in the CISAL project. In: *Assembly and Task Planning, Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium*, 1999, S. 393–398.
- [MEERKAMM11] Meerkamm, H.: Methodology and Computer-Aided Tools – a Powerful Interaction for Product Development. In: *Brinkhofer, H. (Hrsg): The Future of Design Methodology*, London, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2011, S. 55–65.

- [MELZER10] Melzer, I.: *Service-orientierte Architekturen mit Web Services: Konzepte - Standards - Praxis*. 4. Auflage, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2010.
- [MESAROVIĆ70] Mesarović, M.; Macko, D.; Takahara, Y.: *Theory of Hierarchical, multilevel Systems. Mathematics in science and engineering*: Academic Press, 1970.
- [MONTALBO10] Montalbo, T.: *Learning-Derived Cost Evolution in Materials Selection*. Massachusetts Institute of Technology, Dissertation, 2010.
- [PAHL05] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [PATZAK82] Patzak, G.: *Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken*. Berlin: Springer-Verlag, 1982.
- [PINE99] Pine, J.: *Mass customization: the new frontier in business competition*. Harvard Business Press, 1999.
- [ROPOHL09] Ropohl, G.: *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. KIT Scientific Publishing, 2009.
- [RUSITSCHKA11] Rusitschka, F.; Binz, H.; Bunte, J.: Methodology for a holistic view on assembly expenditures. In: *Proceedings of the 21st International conference on production research: Innovation in Product and Production*, 2011, S. 211–221.
- [RUSITSCHKA13a] Rusitschka, F., Zafeiriou, E., Binz, H., & Roth, D.: Consolidating Product and Process Information of Connections—A System-Theoretical Approach. In: *Smart Product Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 103–112, 2013.
- [RUSITSCHKA13b] Rusitschka, F.; Zafeiriou, E.; Binz, H.; Roth, D.: Mechanical Connections in Multi-Variant Series Production: Process Selection. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Production Research*, Iguassu Falls, S. 320–331, 2013.
- [RWTH04] Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) der RWTH and Parametric Technology GmbH (PTC): *Innovationskapazität mitteleuropäischer Unternehmen liegt brach*: München, Aachen: Pressemitteilung, <http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/2c86d060b73ec4c5c1256f4e0056dff0/pressekonferenz15mar2004.pdf>, 2004.
- [SCHUH89] Schuh, G.: *Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten: ein Beitrag zur systematischen Planung von Serienprodukten*, RWTH Aachen, Dissertation, 1989.
- [SEARS97] Sears, K.: Automotive engineering strategic overview. In: *Steel World 2*, 1997, S. 55–68.

- [SED-CHAICHARN10] Sedchaicharn, K.: *Eine rechnergestützte Methode zur Festlegung der Produktarchitektur mit integrierter Berücksichtigung von Funktion und Gestalt*, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2010.
- [TOLEDO MUÑOZ06] Toledo Muñoz, M.: *Agentenbasierte Modellierung und Analyse von Verbindungen im Produktentstehungsprozess*, Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2006.
- [ULRICH76] Ulrich, P.; Hill, W.: Grundlagen-Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). In: *WiST Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt* 5, 1976, S. 304–309.
- [ULRICH01a] Ulrich, H.; Probst, G.: *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: ein Brevier für Führungskräfte. Gesammelte Schriften*: Bern, Stuttgart, Wien: Haupt, 2001.
- [ULRICH01b] Ulrich, H.: *Systemorientiertes Management: Das Werk von Hans Ulrich*, Bern, Stuttgart, Wien: Haupt, 2001.
- [VDA12] VDA; Oliver Wyman: *FAST 2025 - Future Automotive Industry Structure: Massiver Wandel in der automobilen Wertschöpfungsstruktur*, 2012.
- [VDI2210] VDI-Richtlinie (Entwurf) 2210: VDI 2210: *Datenverarbeitung in der Konstruktion; Analyse des Konstruktionsprozesses im Hinblick auf den EDV-Einsatz*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1975.
- [VDI2221] VDI Richtlinie 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, Düsseldorf: VDI Verlag, 1993.
- [VDI2230] VDI-Richtlinie 2230: VDI 2230: *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003.
- [VDI Nachrichten Nr. 3905] VDI Nachrichten Nr. 39: *Schweißtechnik sichert jeden 23. deutschen Arbeitsplatz*. Pressemitteilung, 30.09.2005.
- [VÖLCKERS78] Völckers, U.: *Wiederverwenden konstruktiver Lösungen durch Aufbau firmenspezifischer Konstruktionskataloge*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1978.
- [Volkswagen AGVW 80200-2] Konzernnorm VW 80200-2: *Anbauteile (nicht veröffentlicht)*, 2009.
- [WEMHÖNER05] Wemhöner, N.: *Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau*, RWTH Aachen, Dissertation, 2005.
- [WIEDEMANN07] Wiedemann, J.: *Leichtbau: Elemente und Konstruktion. Klassiker der Technik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [WIENDAHL08] Wiendahl, H.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. München: Hanser, 2008.

- [YU93] Yu, J.-C.; Krizan, S.; Ishii, K.: Computer-aided design for manufacturing process selection. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 4, 1993, S. 199–208.
- [ZENNER06] Zenner, C.: *Durchgängiges Variantenmanagement in der technischen Produktionsplanung*, Universität des Saarlandes, Dissertation, 2006.

ISBN-13:978-3-946924-00-5