

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

## Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik

**Fabian J. Meling**

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

Die Dissertation wurde am 11.06.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 11.10.2012 angenommen.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Automobilproduktion in Deutschland.....	1
1.2 Herausforderungen für die Fahrzeugproduktion.....	2
1.3 Zielsetzung .....	3
1.4 Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2 Grundlagen des automobilen Karosseriebaus.....</b>	<b>5</b>
2.1 Allgemeines.....	5
2.2 Produktionsbezogene Eingliederung.....	5
2.2.1 Einordnung in den Herstellungsprozess.....	5
2.2.2 Fließfertigung .....	6
2.2.3 Modellspezifische Investitionskosten.....	8
2.3 Anlagentechnik des automobilen Karosseriebaus .....	9
2.3.1 Aufbau und Strukturierung.....	9
2.3.2 Technische Ausprägung von Fertigungszellen.....	10
2.4 Planungsprozess .....	12
2.4.1 Grundlagen .....	12
2.4.2 Planungsprozess im Karosseriebau .....	14

2.4.3	Projektspezifische Standardisierung der Anlagentechnik.....	21
2.5	Aktuelle Herausforderungen.....	28
2.5.1	Integration neuer Fahrzeugmodelle.....	29
2.5.2	Wiederverwendung von Anlagentechnik.....	30
2.6	Fazit.....	32
<b>3</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>33</b>
3.1	Allgemeines .....	33
3.2	Wandlungsfähigkeit als Gegenstand der Forschung.....	33
3.2.1	Unternehmen im turbulenten Umfeld .....	33
3.2.2	Flexibilität .....	34
3.2.3	Wandlungsfähigkeit .....	35
3.2.4	Wandlungsbefähiger.....	36
3.3	Kompatibilität .....	38
3.3.1	Schnittstellen automatisierter Betriebsmittel .....	38
3.3.2	ISO/OSI-Modell für die Kommunikation technischer Systeme .....	41
3.3.3	Bussysteme in der Automatisierungstechnik .....	43
3.3.4	Systemarchitekturen für rekonfigurierbare Produktionssysteme.....	49
3.3.5	Vereinfachte Konfiguration durch adaptive Schnittstellen.....	52
3.4	Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen.....	54
3.4.1	Methoden und Vorgehensmodelle .....	54
3.4.2	Bewertung von Rekonfigurationsmaßnahmen.....	65
3.5	Fazit und Handlungsbedarf.....	68
<b>4</b>	<b>Anforderungen an die Methodik.....</b>	<b>71</b>

---

4.1	Allgemeines.....	71
4.2	Grundsätzliche Anforderungen.....	71
4.3	Spezifische Anforderungen.....	73
<b>5</b>	<b>Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik.....</b>	<b>75</b>
5.1	Allgemeines.....	75
5.2	Übersicht Methodik.....	75
5.3	Technisches Kompatibilitätsmodell.....	76
5.3.1	Übersicht Modell.....	77
5.3.2	Ebene 1: Physikalische Anbindung.....	78
5.3.3	Ebene 2: Datenübertragung.....	78
5.3.4	Ebene 3: Treiberbaustein.....	79
5.3.5	Ebene 4: Applikation.....	80
5.4	Bewertungsmodell.....	82
5.4.1	Monetäre Bewertung.....	83
5.4.2	Nicht-monetäre Bewertung.....	84
5.4.3	Ganzheitliche Bewertung und Auswahl.....	86
5.5	Lösungsbibliothek.....	87
5.5.1	Lösungselement.....	87
5.5.2	Funktionale Anforderungen an die Lösungsbibliothek.....	92
5.5.3	Datenbankkonzept Lösungsbibliothek.....	93
5.6	Vorgehensmodell.....	100
5.6.1	Phase 1: Analyse.....	101
5.6.2	Phase 2: Entwurf.....	104

5.6.3	Phase 3: Bewertung.....	106
5.6.4	Phase 4: Realisierung.....	107
5.7	Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle.....	109
<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiel.....</b>	<b>113</b>
6.1	Allgemeines.....	113
6.2	Industrieller Anwendungsfall: Wiederverwendung Industrieroboter....	113
6.3	Analysephase.....	114
6.3.1	Vorgehensweise.....	114
6.3.2	Schnittstellen Industrieroboter.....	115
6.3.3	Schnittstellen Zellensteuerung.....	120
6.3.4	Spezifikation der Kopplungsaufgabe.....	123
6.3.5	Projektspezifische Rahmenbedingungen und Bewertungskriterien	125
6.4	Entwurf.....	127
6.4.1	Lösungsvariante „dezentral“.....	127
6.4.2	Lösungsvariante „zentral“.....	128
6.5	Bewertung.....	129
6.5.1	Monetäre Bewertung.....	129
6.5.2	Nicht-monetäre Bewertung.....	132
6.5.3	Ganzheitliche Bewertung.....	132
6.6	Realisierung.....	133
<b>7</b>	<b>Bewertung von Aufwand und Nutzen.....</b>	<b>135</b>
7.1	Allgemeines.....	135
7.2	Einmalaufwand für Einführung.....	135

---

7.3	Kontinuierliche Aufwände.....	136
7.4	Monetärer Nutzen.....	137
7.5	Monetäre Bewertung.....	138
7.6	Qualitativer Nutzen.....	139
7.7	Fazit.....	140
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>143</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>147</b>
<b>10</b>	<b>Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten.....</b>	<b>162</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2: Eingliederung in den Herstellungsprozess .....	6
Abbildung 3: Organisationsformen der Produktion (BOYSEN 2005, S. 7) .....	7
Abbildung 4: Typische Strukturierung Karosseriebau (KIEFER 2007, S. 9).....	10
Abbildung 5: Aufbau einer Fertigungszelle (in Anlehnung an GIENKE ET AL. 2007, S. 71).....	11
Abbildung 6: Problemlösungszyklus der Systemtechnik (DAENZER 1988, S. 41) .....	12
Abbildung 7: Allgemeine Phasen der Fabrikplanung (KETTNER ET AL. 1984, S. 5) .....	13
Abbildung 8: Planungsphasen im automobilen Karosseriebau .....	15
Abbildung 9: Ablauf Beschaffung (STIEGLER 1999, S. 147).....	18
Abbildung 10: Vorgehen Standardisierung (BMW 2007).....	23
Abbildung 11: Bestandteile Lastenheft (STIEGLER 1999, S. 150) .....	26
Abbildung 12: Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (ZÄH ET AL. 2005A).....	35
Abbildung 13: Übersicht Wandlungsbefähiger (in Anlehnung an NYHUIS ET AL. 2007) .....	37
Abbildung 14: ISO/OSI-Modell (in Anlehnung an SCHROM 2003, S. 27).....	42
Abbildung 15: Typische Netzwerktopologien (FAVRE-BULLE 2004, S. 103).....	45
Abbildung 16: Zustandsmodellbasierte Konfiguration (REINHART & KRUG 2012) .....	53
Abbildung 17: Dynamisches Strukturadaptionskonzept (HILDEBRAND ET AL. 2005, S. 172).....	55
Abbildung 18: Einordnung der Planungsaufgaben in den Planungsablauf (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 93).....	57



---

Abbildung 19: Konzeption des Controllingsystems (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 130) .....	58
Abbildung 20: Grundlegender Aufbau des Bewertungsmoduls (KOHLENER 2008, S. 96) .....	59
Abbildung 21: Vorgehensweise zur Gestaltung modularer Produktionssysteme (NEUHAUSEN 2001, S. 101).....	61
Abbildung 22: Vorgehensweise des 3D-Laserscannens (in Anlehnung an WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 125) .....	63
Abbildung 23: Planung von Rekonfigurationen (BULLINGER ET AL. 2002, S. 545) .....	64
Abbildung 24: Übersicht Methodik .....	76
Abbildung 25: Übersicht Kompatibilitätsmodell .....	77
Abbildung 26: Beispiele für Steckverbindungen .....	78
Abbildung 27: Integration des ISO/OSI-Modells in das Kompatibilitätsmodell.	79
Abbildung 28: Hauptfunktionen von Treiberbausteinen .....	80
Abbildung 29: Beispiel für ein Signalflussdiagramm.....	81
Abbildung 30: Einbindung einer Komponente in eine zentrale Ablaufsteuerung	82
Abbildung 31: Übersicht monetäres Bewertungsmodell .....	84
Abbildung 32: Nutzwertanalyse qualitativer Kriterien .....	85
Abbildung 33: Ganzheitliche Bewertung von Lösungsalternativen .....	87
Abbildung 34: Übersicht Lösungselement.....	88
Abbildung 35: Lösungskonzept Übersicht.....	89
Abbildung 36: Konzeptbild Elektrotechnik Sicherheit.....	90
Abbildung 37: Teilelement nicht-monetäre Aspekte .....	91
Abbildung 38: Klassendiagramm Datenbankobjekte .....	94
Abbildung 39: Klassendiagramm Bewertungsmodell .....	95

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 40: Klassendiagramm Teillösung .....	97
Abbildung 41: Funktion Lösungselemente vergleichen .....	99
Abbildung 42: Benutzeroberfläche Hauptmenü .....	100
Abbildung 43: Phasen und Inhalte Vorgehensmodell .....	101
Abbildung 44: Phasenspezifische Nutzung der Elemente .....	101
Abbildung 45: Übersicht Analysephase .....	102
Abbildung 46: Informationsfluss Analysephase.....	103
Abbildung 47: Übersicht Entwurfsphase.....	104
Abbildung 48: Teilprozesse der Entwurfsphase .....	105
Abbildung 49: Übersicht Bewertungsphase .....	106
Abbildung 50: Vorgehen Bewertungsphase .....	107
Abbildung 51: Übersicht Realisierungsphase.....	108
Abbildung 52: Ergebnisse der Realisierungsphase.....	109
Abbildung 53: Freischnitt Konzeptbild .....	115
Abbildung 54: Bitbelegung der Eingangsdaten des Roboters .....	118
Abbildung 55: Bitbelegung der Ausgangsdaten der Zellensteuerung .....	122
Abbildung 56: Konzeptbild Lösungsansatz „dezentral“ .....	128
Abbildung 57: Konzeptbild Lösungsansatz „zentral“.....	129
Abbildung 58: Nicht-monetäre Bewertung.....	132
Abbildung 59: Portfolio ganzheitliche Bewertung .....	133
Abbildung 60: Aufbauplan Steuerschrank.....	134

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grundsätzliche Anforderungen an die Methodik.....	72
Tabelle 2: Grundsätzliche Anforderungen an Modelle.....	72
Tabelle 3: Spezifische Anforderungen an die Methodik .....	73
Tabelle 4: Funktionale Anforderungen Lösungsbibliothek .....	92
Tabelle 5: Grundfunktionen Aktionsschicht .....	98
Tabelle 6: Ein- und Ausgangsparameter Schrittkettenbaustein Roboter .....	120
Tabelle 7: Ein- und Ausgangsparameter Schrittkettenbaustein Zellensteuerung .....	123
Tabelle 8: Prognostizierte Anzahl eingesetzter Komponenten .....	126
Tabelle 9: Kriterien nicht-monetäre Bewertung .....	126
Tabelle 10: Einmalkosten.....	130
Tabelle 11: Proportionale Kosten.....	130
Tabelle 12: Betriebskosteneffekte.....	131
Tabelle 13: Gesamtkostenwert.....	131
Tabelle 14: Annahmen und Rahmenbedingungen für die Modellrechnung.....	135
Tabelle 15: Einmalaufwände Einführung .....	136
Tabelle 16: Kontinuierliche Aufwände.....	137
Tabelle 17: Monetärer Nutzen .....	138
Tabelle 18: Kapitalwert Einführung und Einsatz Methodik .....	139

### Abkürzungsverzeichnis

AIDA	Automatisierungsinitiative deutscher Automobilhersteller
AWG	American Wire Gauge
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BTK	Bauteilkontrolle
CAD	Computer Aided Design
CPU	Central Processing Unit
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
d. h.	das heißt
DB	Data Block
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
E/A	Eingang / Ausgang
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EVA	Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe
FB	Funktionsbaustein
FC	Funktionsblock
FRG	Freigabe
FSMA	Field Installable Subminiature Assembly
HD	Heckdeckel
HÜMNOS	Herstellerübergreifende Module offener Steuerungen
IP	Internet Protocol
IP XY	Ingress Protection / Schutzart der Kategorie XY
IRT	Isochrone Real Time

---

ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften an der Technischen Universität München
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LAN	Local Area Network
LWL	Lichtwellenleiter
M1 / M2	Modellreihe 1 bzw. 2 im Anwendungsbeispiel
MDS	Mercedes Benz Development System
METEOR	Mehrtechnologie orientierte Werkzeugmaschine
MH	Motorhaube
MnSOP	Monate nach Start of Production
MvS	Monate vor Start of Production
NC	Numerical Control
NPV	Net Present Value / Kapitalwert
OB	Organisationsbaustein
OSACA	Open System Architecture for Controls within Automation Systems
OSI	Open Systems Interconnection
PC	Personal Computer
PCP	Peripherals Communication Protocol
PNO	Profibus Nutzerorganisation
PROZIP	Prozesszielplan der BMW AG
RW	Rückwand
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

## Abkürzungsverzeichnis

---

SFB	Sonderforschungsbereich
SFC	Sequential Function Chart (Schrittkette)
SOP	Start of Production
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SRT	Soft Real Time
SUM	Stuttgarter Unternehmensmodell
SW	Seitenwand
TCO	Total Cost of Ownership
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
u. a.	unter anderem
UDP	User Datagram Protocol
UDT	User Defined Type
UML	Unified Modeling Language
USB	Universal Serial Bus
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDW	Verband deutscher Werkzeugmaschinenhersteller
Vgl.	vergleiche
VoKo	Vorderer Kotflügel
WLAN	Wireless Local Area Network
WZ	Werkzeug
WZL	Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
z. B.	zum Beispiel

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Automobilproduktion in Deutschland

„Deutschland ist Auto-Land. Deutschland hat die Technologien des Automobils über viele Jahre bestimmt und möchte dies auch in Zukunft tun.“ Mit dieser Aussage betont Bundeskanzlerin Angela Merkel anlässlich des 125. Geburtstags des Automobils in ihrem Videoblog im Januar 2011 die aktuelle und zukünftige Bedeutung der Automobilbranche für den Standort Deutschland (MERKEL 2011). Aufgrund ihrer wirtschaftlichen Bedeutung und des hohen Innovationsgrades gilt die Automobilindustrie als eine der Schlüsselindustrien Deutschlands. So wurde im Jahr 2010 jedes sechste weltweit gebaute Fahrzeug von einem deutschen Unternehmen gefertigt. Die Branche generierte einen Umsatz von 315 Mrd. Euro und trug damit mit einem Fünftel erheblich zum Gesamtumsatz der deutschen Industrie bei (VDA 2011, S. 18). Die Fahrzeugindustrie beschäftigte im Jahr 2011 718.000 Personen, dies entspricht einem Anteil von 14% der Gesamtindustrie, und ist aufgrund des hohen Anteils an Akademikern einer der qualifikationsintensivsten Wirtschaftszweige (BMW I 2011, S. 15).

Kernfunktion innerhalb der Aktivitäten der deutschen Automobilindustrie ist die Fahrzeugproduktion, deren Wettbewerbsstärke in erster Linie in einem deutlichen Produktivitätsvorsprung begründet liegt (ZEW 2009, S. 15). Obwohl in der Fahrzeugfertigung ein Trend zur Verringerung der Wertschöpfungstiefe erkennbar ist, sind die traditionellen Gewerke der Fahrzeugproduktion, Presswerk, Karosseriebau, Antriebsstrang und Endmontage, weiterhin als Kernkompetenz der Automobilhersteller einzustufen. Von besonderer Relevanz ist hierbei der Karosseriebau, aufgrund der hohen Bedeutung für das dynamische Verhalten, die Crash-Sicherheit und nicht zuletzt die Qualitätsanmutung für den Kunden. Ursächlich bedingt durch einen hohen Automatisierungsgrad, ist der Karosseriebau durch hohe modellspezifische Investitionen in Anlagentechnik und eine eingeschränkte Modell-, Prozess- und Stückzahlflexibilität charakterisiert (ZEW 2009, S. 77 ff.).

### 1.2 Herausforderungen für die Fahrzeugproduktion

Das Umfeld wirtschaftlichen Handelns wird in den kommenden Jahren durch eine Reihe von Megatrends dominiert, die unterschiedlichen Einfluss, sowohl hinsichtlich Intensität als auch Wirkweise, auf die Produktion haben (ABELE & REINHART 2011, S. 10 ff.). Von besonderer Bedeutung für die Fahrzeugproduktion, insbesondere die Karosseriefertigung, sind dabei neben der Globalisierung die Dynamisierung der Produktlebenszyklen sowie die Durchdringung mit neuen Technologien. Zusätzlich ist die Branche durch eine gesteigerte Volatilität und erschwerte Prognostizierbarkeit der Märkte bestimmt. Beispielsweise stagnierten in den zurückliegenden Jahren der Weltwirtschaftskrise Absatzzahlen und Umsatz oder waren sogar stark rückläufig. So liegt zwischen dem Höchststand des Produktionsindex im Februar 2008 und dem Tiefststand im April 2009 ein Rückgang von knapp 25 Prozent (VDA 2010, S. 15).

Folge dieser Entwicklungen sind neue, bzw. ein Bedeutungsgewinn für bereits existente Anforderungen an die Automobilherstellung. So ist es in Zukunft notwendig, neue Fahrzeugmodelle und damit oftmals einhergehend neuartige Technologien schnell in Karosseriebausysteme zu integrieren. Stückzahlschwankungen und kurzfristige, drastische Verschiebungen des nachgefragten Modellmix erfordern rapide Veränderungen der bereitgestellten Produktionskapazitäten. Vor dem Hintergrund eines zunehmend verschärften Wettbewerbs sind diese Maßnahmen mit minimalem Aufwand in Bezug auf Investition und Betriebskosten zu realisieren.

Bereits 2000 bezeichnete REINHART die Fähigkeit, auf veränderte und nicht vorhersehbare Anforderungen reagieren zu können, als Wandlungsfähigkeit und forderte diese als eine essenzielle Eigenschaft zukünftig erfolgreicher Unternehmen (2000). Wandlungsfähige Systeme können bei Bedarf vorgedachte und geplante Flexibilitätskorridore verlassen und sich an neue und unbekanntere Rahmenbedingungen adaptieren. Diese Anpassungsfähigkeit umfasst dabei technische, organisatorische und menschliche Faktoren (WIENDAHL 2002).

Für den im Rahmen dieser Arbeit im Fokus stehenden Karosseriebau ist die Rekonfiguration, als konkrete Ausprägung eines Wandlungsprozesses, Mittel der Wahl, um den beschriebenen Herausforderungen zu begegnen. Die Rekonfiguration bezeichnet dabei die Umgestaltung einer existierenden Produktionsanlage durch das Entfernen oder die Modifikation vorhandener oder das Hinzufügen neuer Systemelemente (KOREN ET AL. 1999, ELMARAGHY & WIENDAHL 2012).



---

Die Umgestaltung erfolgt dabei in einem taktischen Zeithorizont, also nicht ad-hoc, sondern mit einer vorhergehenden Planung, und umfasst auch strukturelle Veränderungen.

### **1.3 Zielsetzung**

Globales Ziel der Arbeit ist die Steigerung der Wandlungsfähigkeit von hochautomatisierten Produktionsanlagen des automobilen Karosseriebaus. Dies ist notwendig, um aktuellen und zukünftigen Herausforderungen der Fahrzeugproduktion erfolgreich begegnen zu können.

Die Unterstützung von Rekonfigurationsprozessen als konkrete Wandlungsmaßnahme ist die abgeleitete Intention dieser Arbeit. Da für das Betrachtungsfeld heute in erster Linie technische Limitationen, wie beispielsweise komplexe und heterogene Systemlandschaften kombiniert mit hohen Qualitäts- und Verfügbarkeitsanforderungen vorherrschen, fokussiert sich diese Arbeit auf die Felder technische Planung und Konzeption sowie technische Lösungsentwicklung.

Ziel der Arbeit ist es, eine industriell anwendbare Methodik zu entwickeln, die ausführende Mitarbeiter der technischen Planung und Systemgestaltung dahingehend unterstützt, Rekonfigurationsmaßnahmen für Produktionsanlagen des automobilen Karosseriebaus aufwandsarm und qualitätssicher zu planen und durchzuführen. Dabei steht die Entwicklung, Bewertung und Realisierung von technischen Lösungskonzepten, die die Rekombination von nicht-kompatiblen Komponenten und Systemen ermöglichen, im Fokus.

### **1.4 Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit gliedert sich inklusive der Einleitung in acht Kapitel, deren Struktur und Abfolge in Abbildung 1 ersichtlich ist. In den vorangegangenen Abschnitten wurden bereits die Ausgangssituation der Automobilproduktion in Deutschland, zukünftige Herausforderungen und darauf aufbauend die Zielsetzung der Arbeit erläutert. Ebenso fand eine erste Eingrenzung des Betrachtungsbereichs statt.

Eine Darstellung der Grundlagen des automobilen Karosseriebaus ist Inhalt von Kapitel 2. Nach einer produktionsbezogenen Eingliederung werden neben den

technischen Aspekten der Anlagentechnik auch die Planungsprozesse und aktuelle Herausforderungen, die den Anstoß für diese Arbeit geben, erläutert.

Kapitel 3 thematisiert, aufbauend auf den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Handlungsbedarfen, die relevanten Ergebnisse und Aktivitäten in Wissenschaft und Technik. Die wesentlichen Inhalte sind dabei Arbeiten zur Wandlungsfähigkeit und Kompatibilität sowie zur Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen. Ausgehend davon wird abschließend der konkrete Handlungsbedarf abgeleitet. Die Aggregation und Spezifikation der Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik erfolgt im vierten Kapitel. Grundlage hierfür bilden die Inhalte von Kapitel 2 und Kapitel 3. Die Vorstellung der erarbeiteten Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik erfolgt in Kapitel 5 und gliedert sich in eine Übersichtsdarstellung und eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Modelle und Module. Die exemplarische Anwendung der Methodik erfolgt anschließend in Kapitel 6. Kapitel 7 beinhaltet eine kritische Diskussion der vorgestellten Methodik, die eine Bewertung von Aufwand und Nutzen umfasst. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick, der Ansatzpunkte für weitere Forschungsarbeiten identifiziert, findet sich abschließend in Kapitel 8 dieser Arbeit.

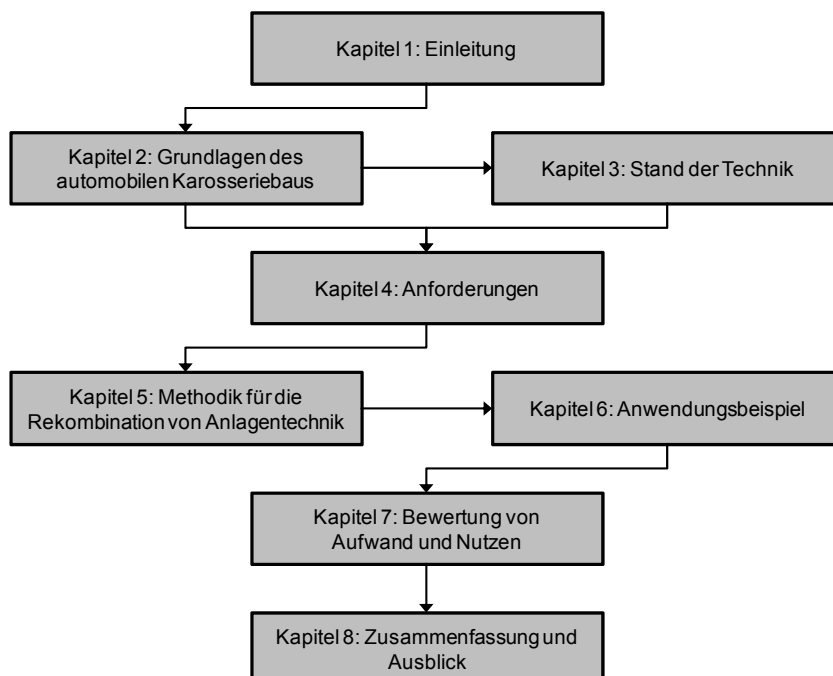


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

---

## **2 Grundlagen des automobilen Karosseriebaus**

### **2.1 Allgemeines**

Kapitel 2 der Arbeit gibt einen Überblick über die Grundlagen des automobilen Karosseriebaus. Neben einer Eingliederung in die Produktion des Gesamtfahrzeugs wird die eingesetzte Anlagentechnik vorgestellt und der zugehörige Planungsprozess beschrieben. Eine Betrachtung der veränderten Rahmenbedingungen in der Automobilindustrie und ein Fazit schließen das Kapitel ab.

### **2.2 Produktionsbezogene Eingliederung**

#### **2.2.1 Einordnung in den Herstellungsprozess**

Den Karosseriebau betrachtet die Mehrzahl der Automobilhersteller als Kernkompetenz (OLIVER WYMAN 2006). Ein Grund hierfür ist die Tatsache, dass das optische Erscheinungsbild der Außenhaut dem Kunden über Merkmale wie Fugenbild, Spaltmaße oder Passungen einen direkten Qualitätseindruck vermittelt. Aufgrund dieser besonderen Bedeutung des Karosseriebaus liegt die Eigenleistungstiefe zwischen 80-100% und ist damit dreimal so hoch wie bei anderen Gewerken (KIEFER 2007, S. 7). Der Begriff Gewerk hat sich in der Automobilindustrie etabliert und kann als Synonym für die Begriffe Fertigungsbereich bzw. Bereich verwendet werden.

Der Herstellungsprozess eines Automobils lässt sich im Regelfall in fünf Hauptgewerke unterteilen: Dem Presswerk, dem Karosseriebau, der Lackiererei (Oberfläche), dem Antriebsstrang (Powertrain) und der Endmontage (MEICHSNER 2007, S. 6). In Abbildung 2 ist der Zusammenhang der Gewerke verdeutlicht.

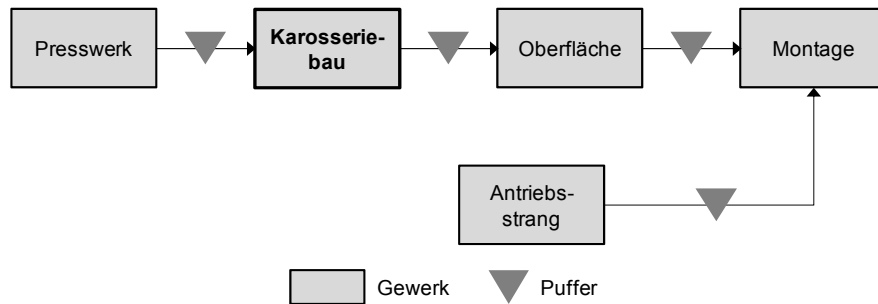


Abbildung 2: Eingliederung in den Herstellungsprozess

Der Karosseriebau ist zwischen dem Presswerk und der Lackiererei (Oberfläche) angeordnet. Die Hauptfunktion besteht im Fügen der im Presswerk gefertigten Teile. Das Fügen einer Karosserie im heutigen Karosseriebau erfolgt hauptsächlich durch Metallschutzgasschweißen und Widerstandspunktschweißen, in Sonderfällen auch durch Laseranwendungen. Außerdem kommen das Kleben und gekoppelte Fügeverfahren, wie das Punktschweißkleben, zum Einsatz (FÜSSEL 2003). Im automobilen Karosseriebau ist die serielle Anordnung der Prozesse am weitesten verbreitet. Sie bietet in der variantenreichen Serienfertigung die Möglichkeit zur Fertigung sehr hoher Stückzahlen (RÖHRIG 2002). Anschließend werden die gefügten Teile geprüft und gereinigt, bevor die Karosserie im Oberflächengewerk lackiert wird (RICHTER 2007, S. 2). Parallel hierzu wird der Antriebsstrang, bestehend aus Motor, Getriebe, Kupplung, Differential, Seitenwellen und Rädern, gefertigt und montiert. In der Endmontage erfolgt die „Hochzeit“, d. h. die Verbindung zwischen der lackierten Karosserie mit Interieur und dem Antriebsstrang.

### 2.2.2 Fließfertigung

Ein Produktionsprozess setzt sich aus einem oder mehreren Arbeitsgängen zusammen. Mit Hilfe von Betriebsmitteln vollziehen Arbeitskräfte dabei die Arbeitsgänge am Werkstück (BOYSEN 2005, S. 5). Betriebsmittel sind diejenigen betrieblichen Ausstattungen und Einrichtungen, welche unter Ausnutzung physikalischer, chemischer, biologischer oder sonstiger Naturgesetze technische Arbeit verrichten. Dies sind Anlagen, Maschinen, Vorrichtungen, Werkzeuge und Messmittel (KETTNER ET AL. 1984, S. 52).

Je nach Anordnung der Produktionseinheiten lassen sich die in Abbildung 3 gezeigten Organisationsformen der Produktion unterscheiden. Eine erste Einteilung erfolgt dabei in Funktionsprinzip und Flussprinzip. Bei ersterem werden die Betriebsmittel räumlich zu Werkstätten zusammengefasst. Der Fluss des Werkstücks orientiert sich an der räumlichen Verteilung der Werkstätten. Bei letzterem werden die Betriebsmittel entsprechend der Arbeitsgänge am Werkstück ausgerichtet. Die Reihenfertigung besteht ohne zeitliche Kopplung einzelner Arbeitsschritte. Bei Vollendung des Arbeitsschritts bzw. bei Bedarf wird der nächste Arbeitsschritt eingeleitet. Zeitliche Kopplung entsteht durch das Abtakten der Betriebsmittel, d. h. wenn „die Leistungsdurchschnitte der Betriebsmittel aufeinander abgestimmt sind“ (KISTNER & STEVEN 2001, S. 24). Im Gegensatz zur Zwangslauffertigung kann die zeitliche Kopplung auch künstlich erreicht werden. Es wird dispositiv eine maximale Bearbeitungszeit festgelegt, nach Ablauf wird das Werkstück an die nächste Arbeitsstation weitergereicht. Dieses Prinzip wird Fließfertigung genannt.

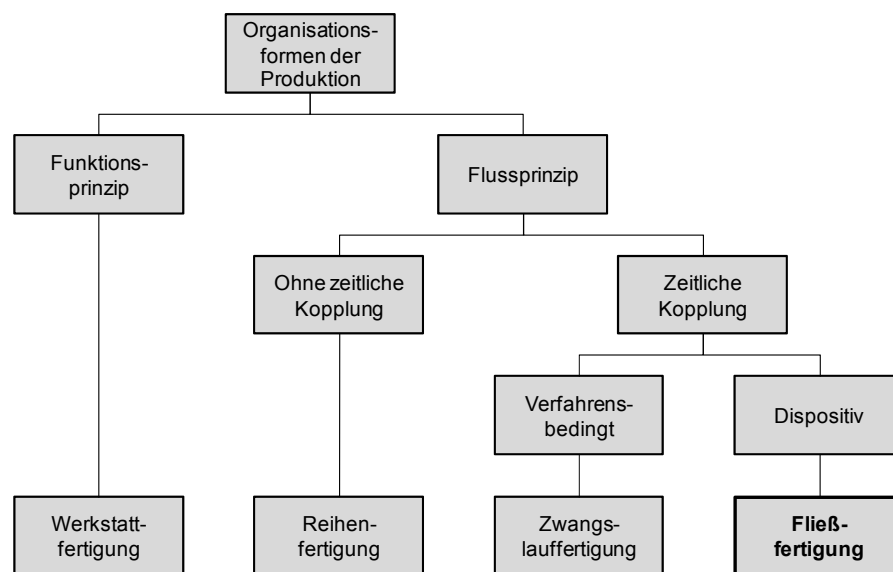


Abbildung 3: Organisationsformen der Produktion (BOYSEN 2005, S. 7)

Die Fließfertigung ist eine Organisationsform der Produktion, die durch eine Vielzahl von Bearbeitungsschritten gekennzeichnet ist. Jede Station führt dabei einen oder mehrere Arbeitsschritte aus, die aus dem produktspezifischen Arbeitsplan abgeleitet werden. Eine definierte Höchstbearbeitungszeit, auch Taktzeit genannt, ist dabei für alle Stationen gültig. Wenn mehrere Produkte auf der gleichen Linie produziert werden, spricht man von einer Variantenfließfertigung.

Zum Produzieren unterschiedlicher Produkte sind keine oder zumindest keine nennenswerten Umrüstvorgänge notwendig.

Die Besonderheiten einer Fließfertigung bestehen aus einem hohen Maß an Arbeitsteilung und Spezialisierung. Dadurch werden hohe Produktionsgeschwindigkeiten erreicht. Zusätzlich ergibt sich eine vorteilhafte Kapazitätsausnutzung, da Rüstkosten und Transportzeiten gering sind.

Die Produktion des Karosseriebaus ist nach dem Prinzip der Fließfertigung aufgebaut, da so große Durchlaufzahlen und damit geringe Stückkosten realisiert werden können. Der VW Käfer hatte in den 1960er Jahren Produktionszahlen von 4000 Einheiten pro Tag mit einer Taktzeit von 30 Sekunden. Diese Stückzahlen sind heute nicht mehr absetzbar. Um trotzdem eine große Stückzahl pro Linie zu realisieren, werden durch die Variantenfließfertigung mehrere ähnliche Modelle auf einer Linie hergestellt (MEICHSNER 2007, S. 31). Die Stückzahlen der Großserienfertigung von Karosserien liegen heute bei ca. 1000 Einheiten pro Tag, was einer Taktzeit von ca. 60 Sekunden entspricht (WIENDAHL 2005, S. 32).

### 2.2.3 Modellspezifische Investitionskosten

Innerhalb der Branche kommt dem Gewerk Karosseriebau unter anderem aufgrund der hohen Eigenleistungstiefe und der hohen Kostenintensität eine besondere Bedeutung zu (RICHTER 2007, S. 24, STIEGLER 1999, S. 59).

Durch den hohen Automatisierungsgrad von über 90% bedingt, sind für jedes neu eingeführte Fahrzeugmodell Investitionen im dreistelligen Millionenbereich erforderlich (SPIECKERMANN ET AL. 2000, S. 276). WEMHÖNER nennt als Faustregel 1 Mio. Euro Investition für die Produktionskapazität von einem Fahrzeug pro Schicht bei einer branchentypischen, relativ geringen Auslastung des Karosseriebaus über die gesamte Lebensdauer von ca. 50% (2006, S. 25). Folgen dieses hohen Investitionsbedarfs und der geringen Auslastung sind die hohen anteiligen Herstellkosten von 15-20% eines Fahrzeugs, die durch den Karosseriebau verursacht werden (LOREK ET AL. 2002, S. 11).

Eine Strategie, diesem Sachverhalt zu begegnen, ist die Umlage der Investitionskosten auf eine möglichst große Anzahl produzierter Einheiten. Dies kann beispielsweise durch flexible, mehrtypfähige Karosseriebauanlagen oder durch Gleichteile bzw. Plattformkonzepte auf Produktseite geschehen (KOCHAN 2002, S. 19–20, S. 11, BARTH 2002).

---

## 2.3 Anlagentechnik des automobilen Karosseriebaus

### 2.3.1 Aufbau und Strukturierung

Der Karosseriebau eines Automobilherstellers setzt sich in der Regel aus mehreren Linien zusammen, wobei hier meist zwischen Haupt- und Nebenlinien unterschieden wird (WEMHÖNER 2006, S. 19). In den Nebenlinien werden die einzelnen, aus dem Presswerk stammenden Erzeugnisse zu Baugruppen und Unterbaugruppen gefügt. Die entstandenen Module werden dann in der Hauptlinie zusammengebaut, wobei in mehreren Schritten die Karosserie entsteht.

Abbildung 4 zeigt eine typische Karosseriebaustruktur. Dabei ist die Hauptlinie in drei Zusammenbaustufen untergliedert. In der ersten Zusammenbaustufe (Z1) wird die Plattform aus den Baugruppen Vorbau, Hauptboden und Heckboden erstellt. Auf diese Plattform werden in der zweiten Zusammenbaustufe (Z2) das Dach, die Rückwand sowie die Seitenwand mit den inneren Strukturteilen, wie z. B. die B-Säule, montiert. Die Einzelteile werden dabei zunächst durch wenige Schweißpunkte verbunden. In der sich anschließenden Ausschweißstation werden die Bauteile durch Spannvorrichtungen fixiert und ausgeschweißt (SHIMOKAWA 1997, S. 122). Die dritte Zusammenbaustufe (Z3) komplettiert die Karosserie durch sämtliche Anbauteile wie Türen, Heckklappe, Kotflügel. Nach Z3 wird die fertige Karosserie kontrolliert und gegebenenfalls noch nachbearbeitet (KIEFER 2007, S. 9).

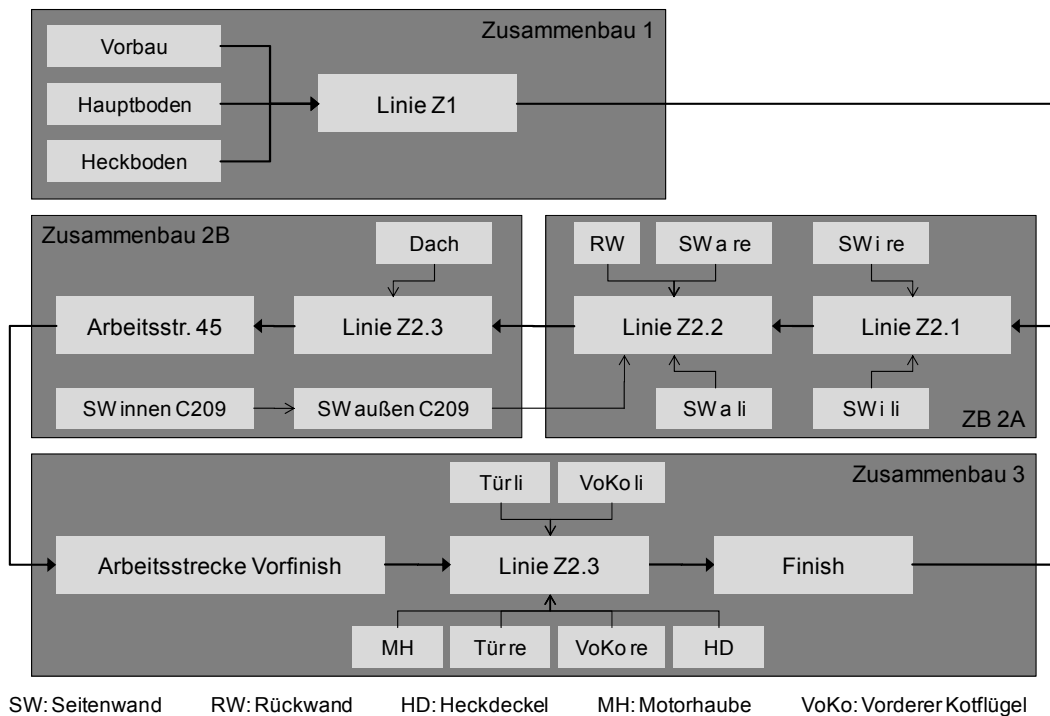


Abbildung 4: Typische Strukturierung Karosseriebau (KIEFER 2007, S. 9)

### 2.3.2 Technische Ausprägung von Fertigungszellen

Automatisierte Produktionsanlagen werden im Karosseriebau üblicherweise in sogenannte Fertigungszellen gegliedert. Nach BERNING setzt sich eine Fertigungszelle aus „einem Bearbeitungszentrum und einem maschinenexternen Werkstückspeicher zusammen und ist durch die Automatisierung der Materiallogistik gekennzeichnet. Weiterhin verfügt sie über eine eigenständige Steuerung, die bestimmte Transformationsvorgänge vollständig und autonom ausführt und über definierte Schnittstellen der Ver- und Entsorgung mit dem Gesamtorganismus der Produktion verbunden ist“ (2001). Ähnliche Definitionen finden sich auch bei STIEGLER (1999, S. 53) und WIENDAHL (2010, S. 36). Typische Synonyme für den Begriff Fertigungszelle sind Arbeitsstation, Bandabschnitt oder SPS-Bereich (SPS Speicherprogrammierbare Steuerung).

Fertigungszellen setzen sich aus Teilsystemen zusammen, die den Kategorien Bearbeitungssystem, Materialflusssystem und Informationssystem zugeordnet werden können. Abbildung 5 zeigt eine Einteilung nach GIENKE ET AL. (2007).



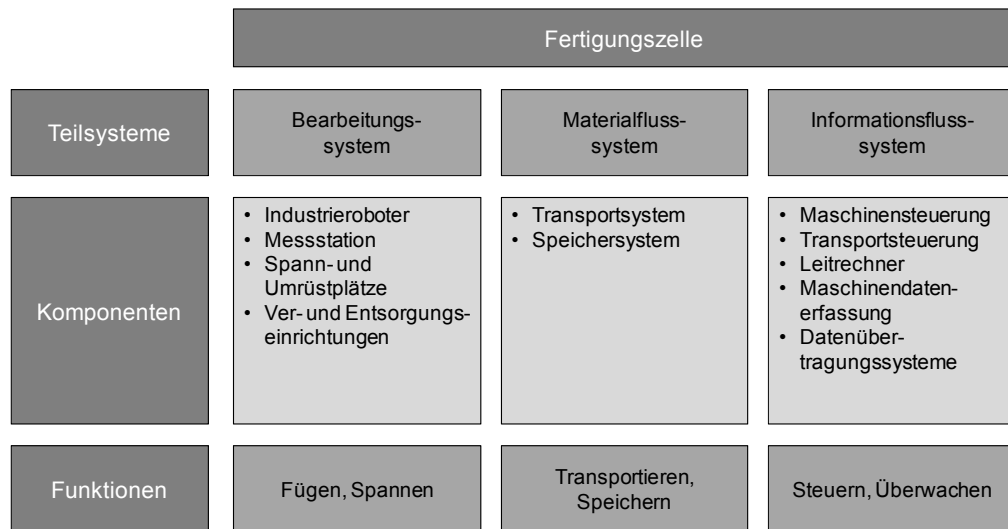


Abbildung 5: Aufbau einer Fertigungszelle (in Anlehnung an GIENKE ET AL. 2007, S. 71)

Typischerweise besteht das Bearbeitungssystem aus mehreren Industrierobotern, Spannelementen und Schweißzangen. Verschiedene elektronische Elemente steuern das Informationsflusssystem. Die Zellensteuerung wird in der Regel mittels einer speicherprogrammierbaren Steuerung, die sich aus ein oder mehreren Mikroprozessoren (CPU - Central Processing Unit) sowie zugehörigem Speicher für Daten und Programme zusammensetzt, realisiert. Die Informationsverarbeitung erfolgt nach dem EVA-Prinzip (Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe). Von der Sensorik erfasste Daten werden in die CPU eingelesen und entsprechend der in den Steuerungsprogrammen hinterlegten Logik bearbeitet. Anschließend werden die Steuersignale an die Aktorik (Ventile, Motoren) ausgegeben.

Des Weiteren lassen sich die Subsysteme und Komponenten, die eine Fertigungszelle bilden, in typgebundene und typungebundene Betriebsmittel einteilen (STIEGLER 1999, S. 132). Typungebundene Betriebsmittel, wie beispielweise Industrieroboter, Spannelemente, Drehtische oder Zentralsteuerungen, können produktunabhängig eingesetzt werden. Typgebundene Betriebsmittel weisen hingegen einen konkreten Produktbezug auf. Beispiele sind geometriebestimmende Vorrichtungen und Greifer sowie Schweißzangen, die für produktspezifische Fügeoperationen ausgelegt sind. Der Anteil typgebundener Investitionen liegt im Karosseriebau heute üblicherweise bei 60% (MEICHSNER 2007, S. 41).

### 2.4 Planungsprozess

#### 2.4.1 Grundlagen

Ein grundlegender Planungsansatz zur Unterstützung der Systemplanung und für die zielorientierte Lösungsentwicklung wurde von DAENZER im Rahmen der Systemtheorie entwickelt (1988, S. 40 ff.). Das Vorgehensmodell basiert auf der Definition von sechs Lebensphasen eines Systems: Vorstudie, Hauptstudie, Detailstudie, Systembau, Systemeinführung und Systembenutzung. Für die Planung jeder dieser Phasen wird nach der Theorie der Systemtechnik der sogenannte Problemlösungszyklus (Abbildung 6) mindestens einmal, teilweise auch iterativ, durchlaufen. Dieser ist in sechs Einzelschritte gegliedert, die zu drei Abschnitten zusammengefasst werden können. Die Zielsuche umfasst dabei die Schritte Problemanalyse und Problemformulierung. Der zweite Arbeitsbereich dient der Lösungssuche und stellt einen Syntheseschritt dar. Die Einzelschritte Systemanalyse, Bewertung und Entscheidung sind Inhalte des dritten Arbeitsbereiches Lösungsauswahl.

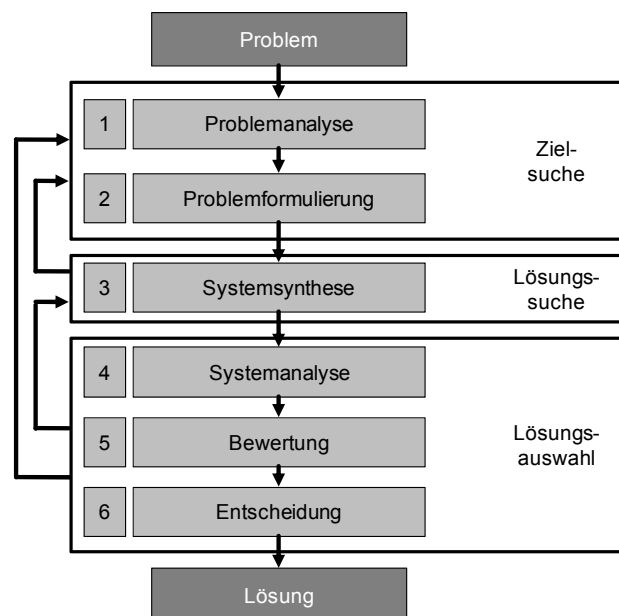


Abbildung 6: Problemlösungszyklus der Systemtechnik (DAENZER 1988, S. 41)

Eine Konkretisierung des beschriebenen generischen Vorgehens im produktionstechnischen Umfeld stellen die Vorgehensmodelle der Fabrikplanung dar. So zeigt Abbildung 7 die allgemeinen Phasen der Fabrikplanung. Diese sind Ziel-

---

planung, Vorarbeiten, Grobplanung, Feinplanung, Umsetzungsplanung und Umsetzung (KETTNER ET AL. 1984, S. 12 ff.).

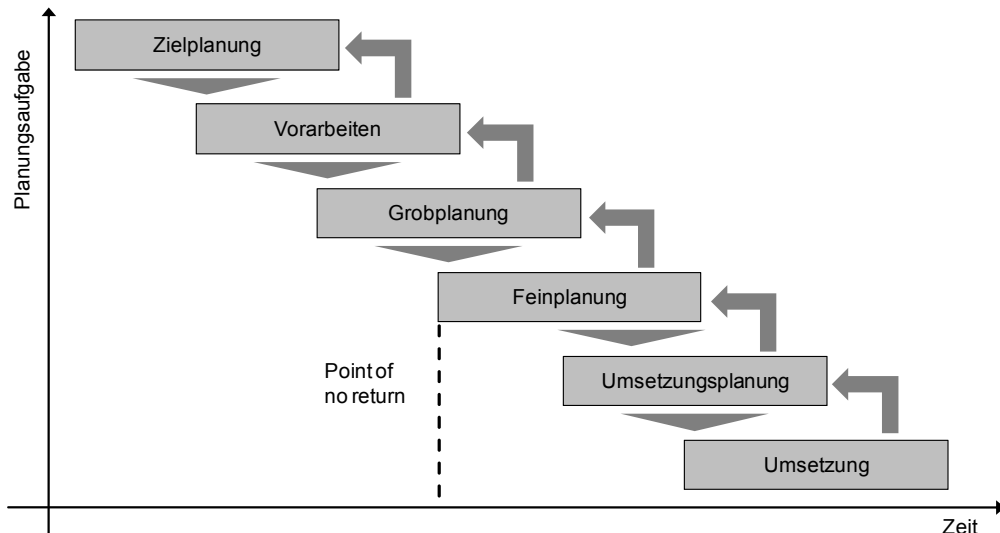


Abbildung 7: Allgemeine Phasen der Fabrikplanung (KETTNER ET AL. 1984, S. 5)

Dieses stufenweise Vorgehen bildet die Grundlage für eine Vielzahl von Phasenkonzepten für eine zeitliche und inhaltliche Gliederung des Fabrikplanungsprozesses (vgl. u.a. AGGTELEKY 1987, S. 31 ff., EVERSHEIM & SCHMIDT 2001, FELIX 1998, S. 87 ff., GRUNDIG 2009, S. 40 ff., REFA 1990, S. 151 ff., SCHMIGALLA 1995, S. 29, WIENDAHL 1996). Alle Konzepte gliedern den Planungsprozess dabei in sechs wesentliche Abschnitte. Die initiale Phase ist dabei die Zielplanung, welche die Detaillierung der Projektidee und der konkreten Aufgabenstellung umfasst. Hierbei werden ausgehend von der Ausgangssituation, der Aufgabenstellung, den globalen und langfristigen Unternehmenszielen, dem Zeit- und Kostenrahmen und der Projektorganisation die spezifischen Projektziele festgelegt (KETTNER ET AL. 1984, S. 12). Die Vorarbeiten beinhalten eine weitere Konkretisierung der Aufgabenstellung, die Ermittlung der Planungsgrundlagen und eine Bedarfsabschätzung (Betriebsmittel, Personal, Flächen, Kapital und Zeit). Den Abschluss der Vorarbeiten bildet die Freigabe der konkreten, zeitbezogenen Planungsarbeiten (AGGTELEKY 1987, S. 31). Die Entwicklung und Bewertung von idealisierten Lösungsalternativen als Ergebnis der Funktionsbestimmung, Vordimensionierung, Strukturierung, Groblayoutplanung und Festlegung der Steuerungsprinzipien ist Inhalt der Grobplanung (WIENDAHL 2010, S. 239, GRUNDIG 2009, S. 65). Die Vorzugsvariante wird im Rahmen der Feinplanung bis zur Ausführungsreife ausgearbeitet. Der Fokus liegt hierbei auf

einer detaillierten Prozessplanung und der Ausgestaltung der einzelnen Betriebsmittel. Die Umsetzungsplanung ist nach GRUNDIG im Wesentlichen durch die Definition von Aufgabenkomplexen, die Erstellung von Ablauf- und Terminplänen zur Sicherung der Projektkoordination sowie die Festlegung von Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten geprägt (2009, S. 188). In der Umsetzungsphase erfolgt die Durchführung der geplanten Aktivitäten, die Inbetriebnahme der Gewerke und eine begleitende Funktions-, Kosten- und Terminkontrolle (KETTNER ET AL. 1984, S. 30, EVERSHEIM & SCHMIDT 2001, FELIX 1998, S. 99).

### 2.4.2 Planungsprozess im Karosseriebau

In der Automobilindustrie, insbesondere im Segment der deutschen Premium-Hersteller, ist es üblich, für neue Modellreihen neue Produktionslinien im Karosseriebau zu errichten (SPIECKERMANN ET AL. 2000, S. 276). Der Startpunkt für die Planung der Produktionslinien liegt zwischen 48 und 24 Monaten vor der Produktion des ersten Fahrzeugs, des sogenannten Start of Production (SOP) (SEKINE ET AL. 1991). Der Planungsprozess im automobilen Karosseriebau fokussiert in der Praxis die drei Kernaufgaben Anlagen-, Layout- und Arbeitskräfteplanung (WEMHÖNER 2006, S. 26). Die einzelnen Aspekte werden dabei in den in 2.4.1 beschriebenen Planungsphasen mit unterschiedlicher Intensität bearbeitet, wobei die Arbeitskräfteplanung aufgrund des hohen Automatisierungsgrades im Karosseriebau eine untergeordnete Rolle spielt. Unterschieden wird zudem zwischen der Prozessplanung, die den Produktionsprozess behandelt, und der Betriebsmittelplanung, die die Anlagen- und die Vorrichtungsplanung umfasst (STIEGLER 1999, S. 134). In typischen Karosseriebauprojekten existieren in der Regel analog die unterschiedlichen Rollen Prozess- und Anlagenplaner. In großen Projekten wird zusätzlich die Anlagenplanung in mechanische und elektrotechnische Aspekte unterteilt.

Das Vorgehen für Planungsprozesse, einzelne Phasen, definierte Teilergebnisse und Meilensteine sind heute bei Automobilherstellern in der Regel in Form von Prozessleitfäden dokumentiert (DORNHEIM 2006, STIEGLER 1999, S. 22). Beispiele hierfür sind das Mercedes Benz Development System (MDS) oder der Prozesszielplan (PROZIP) der BMW AG (MELING 2009, MELING 2010). Der im Folgenden dargestellte karosseriebauspezifische Planungsprozess stellt das abstrahierte Ergebnis einer detaillierten Prozessanalyse in den Planungsabteilungen der Mercedes Benz Car Group und der BMW AG dar. Die Prozessanalyse erfolgte dabei über die Methoden der Datenerfassung nach KETTNER ET AL. (1984, S.

37). Befragungen bzw. Interviews dienten dabei als Mittel der direkten Datenerfassung. Ergänzend wurde eine indirekte Datenerfassung anhand von Planungsunterlagen und betrieblichen Aufzeichnungen durchgeführt. Abbildung 8 zeigt die typischen Planungsphasen in automobilen Karosseriebauprojekten, wie sie im Rahmen der Analyse ermittelt werden konnten, in einer Übersicht.

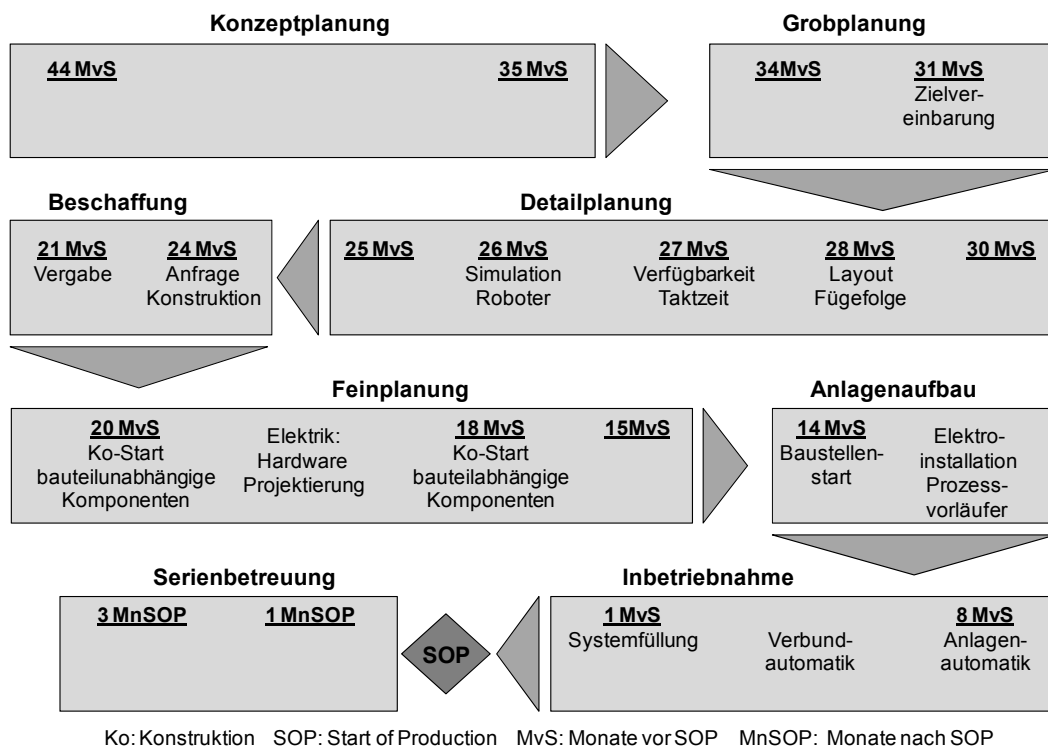


Abbildung 8: Planungsphasen im automobilen Karosseriebau

## Konzeptplanung

Die initiale Phase der Planung von Produktionsanlagen im Karosseriebau ist die Konzeptplanung. Diese beginnt ca. 44 Monate vor SOP (MvS) und endet ca. 35 MvS. Mit Hilfe der übergeordneten Projektziele (Budget- und Terminvorgaben, Besonderheiten wie Nachhaltigkeit, usw.) werden die konkreten Planungsprämissen für den Karosseriebau abgeleitet. Zusätzlich ergibt sich aus dem Produktkonzept ein erstes grobes Anlagenkonzept, welches als Blocklayout oder Ideallayout bezeichnet wird. Es werden die einzelnen Funktionseinheiten über die Beziehungen aus Material-, Informations-, Personal- und Energiefluss verknüpft. Anordnung und konkrete geometrische Ausprägung spielen noch keine

Rolle, die Funktionseinheiten werden als rechteckige Flächen angegeben und entsprechend der Einhaltung einer möglichst idealen Zuordnung in Bezug auf Materialfluss und Transportbeziehungen angeordnet.

### **Grobplanung**

Die Grobplanung beginnt nach Abschluss der Konzeptplanung und findet im Zeitraum von 34 bis 31 MvS statt. Für die anfallenden Aufgaben ist der Prozessplaner verantwortlich. In einem ersten Schritt werden die erhaltenen Produktdaten in ein Prozessplanungswerkzeug aufgenommen und können dort mit Prozess- und Ressourcendaten verknüpft werden (DEUSE ET AL. 2006, ZÄH ET AL. 2005B). Außerdem wird ein Produktionsgrobkonzept entwickelt, dieses enthält die Anzahl der Arbeitsstationen, die Taktzeiten sowie die gewünschte Verfügbarkeit. Zusätzlich werden Puffer dimensioniert und die interne Logistik grob definiert. Typische Softwarewerkzeuge der Prozessplanung sind die Programme emDesigner (Siemens PLM) oder Delmia Process Engineer (Dassault Systems). Ein weiterer wichtiger Inhalt der Grobplanung ist die Absicherung des Produktionsgrobkonzepts. Dies erfolgt in der Regel mit Hilfe von Simulationswerkzeugen für Fabrikplanung und Materialfluss, wie etwa Plant Simulation (Siemens PLM). Anschließend erfolgt eine weitere Verfeinerung des Anlagenkonzeptes. Das Blocklayout aus der Konzeptplanung wird mit Hilfe von Softwareprogrammen für die 2D-Layoutplanung, wie Microstation (Bentely) oder AutoCAD (Autodesk), weiter detailliert. Aus diesem sogenannten idealen Anlagenkonzept wird dann ein realisierbares Anlagenkonzept, das Groblayout (AGGTELEKY 1990, S. 586), abgeleitet. Wichtigste Teilaufgaben dabei sind die Anpassung an die vorgegebenen Gebäudegrundrisse sowie die Einplanung von Transportwegen. Hier ergeben sich zwangsweise Abweichungen vom Idealkonzept, da beispielsweise der Materialfluss von vorhandenen Toren, Gleisanschlüssen, Rampen, Aufzügen, Kränen, etc. abhängig ist. Üblicherweise werden unterschiedliche Varianten geplant und hinsichtlich verschiedener Kriterien evaluiert (SCHMIGALLA 1995, S. 93 ff.).

### **Detailplanung**

Die Detailplanung beginnt 30 MvS, endet 25 MvS und beinhaltet den Point-of-no-Return. Bis zu diesem Planungsschritt werden mehrere Konzepte parallel geplant und bewertet. In der Detailplanung wird eine Entscheidung für ein Konzept getroffen. Eingangsgrößen sind das Produktionsgrobkonzept, das Groblayout sowie das Spann- und Fixierkonzept. Letzteres wird zusammen mit der Produkt-

---

entwicklung entworfen und legt insbesondere fest, wie und durch welche Vorrichtungen Werkstücke beim Zusammenfügen aufgespannt und fixiert werden. Mit diesen Daten verfeinern Prozess- und Anlagenplaner das Groblayout und erstellen ein Detaillayout, welches auch als Feinlayout bezeichnet wird (SCHMIGALLA 1995, S. 345). Das Feinlayout besitzt einen hohen Detaillierungsgrad und enthält die endgültige räumliche Anordnung der Einrichtungen, Maschinen, Arbeitsplätze, Ver- und Entsorgungssysteme. Die Planung findet nicht nur, wie beim Block- und Groblayout, in 2D statt, sondern liefert als Ergebnis ein 3D-Layout. Unterstützende Werkzeuge für die Planer sind Konstruktionsprogramme, wie etwa Microstation (Bentely), AutoCAD (Autodesk), NX (Siemens PLM) oder CATIA (Dassault Systems). Als iterativer Prozess und zeitlich parallel erfolgt die geometrische Absicherung bzw. Geometriesimulation der Fertigungszellen. Mit Hilfe von Robotersimulationswerkzeugen, wie Process Simulate bzw. RobCAD (Siemens PLM) oder Delima Robotics (Dassault Systems), werden die Arbeitsschritte der Roboter in der virtuellen 3D-Zelle simuliert und die Zugänglichkeit von Roboter und Prozesstechnik an die Bearbeitungsstelle am Fahrzeug abgesichert. Hierzu müssen im Vorfeld die Roboter-Offline-Programme erstellt werden. Parallel wird anhand der Simulation analysiert, ob die erreichbaren Taktzeiten der Roboter den Planvorgaben entsprechen. Nach dem Abschluss dieser Tätigkeiten ist das Layout abgesichert und entspricht einem finalen Stand für die Umsetzung. Abschließender Inhalt der Detailplanung ist die Vorbereitung der Beschaffungsphase. Diese erfolgt in der Regel getrennt für die Fachbereiche Mechanik und Elektrik bzw. Steuerungstechnik. Der Mechanikplaner erstellt das Mengengerüst für die Beschaffung der Mechanikkomponenten. Mit der Finalisierung des 3D-Zellenlayouts beginnt der Elektrikplaner mit der zellenbezogenen Elektroplanung. Hierbei werden in einem größtenteils manuellen Prozess Stromlaufpläne und Stücklisten erarbeitet. Auf Basis dieser Dokumente werden die Mengengerüste für die Elektrikkomponenten angefertigt.

### **Beschaffung**

Im Rahmen des Beschaffungsprozesses zwischen 24 und 21 MvS wird zusätzlich zur ausführenden Planungsabteilung ein weiterer Partner über ein festes Vertragsverhältnis in den Anlagenerstellungsprozess integriert. Neben externen Lieferanten ist es in der Automobilindustrie üblich, den unternehmensinternen Anlagenbau in den Erstellungsprozess einzubinden. Die Schnittstelle zwischen Planung und Anlagenlieferant und auch die Abwicklung ist dabei aber in der Regel identisch wie bei externen Partnern. Die wesentlichen Aktivitäten und Ergebnisse der Beschaffungsphase sind in Abbildung 9 ersichtlich.

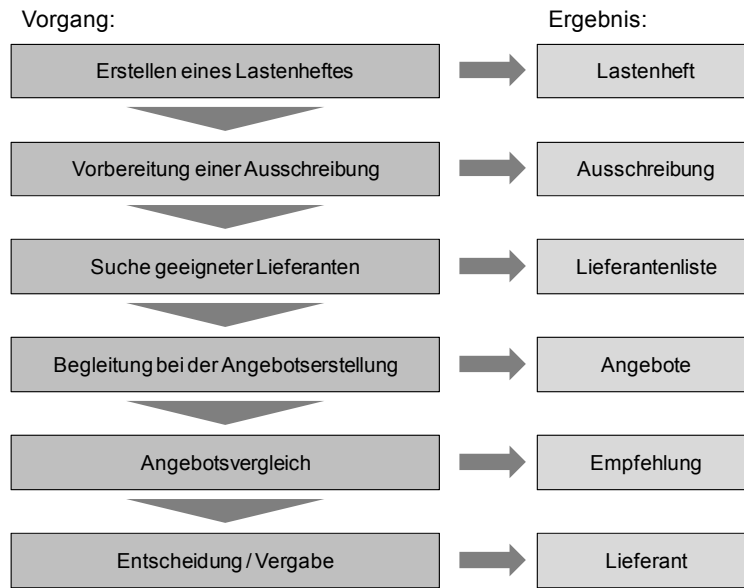


Abbildung 9: Ablauf Beschaffung (STIEGLER 1999, S. 147)

Kerndokument des Beschaffungsprozesses ist das Lastenheft, welches ein Ergebnis der vorangehenden Planungsphasen darstellt. Übergeordneter Zweck des Lastenhefts ist die Angebotseinholung. Es ist in die drei Teile „Technischer Abschnitt“, „Allgemeiner Abschnitt“ und „Kaufmännischer Abschnitt“ gegliedert (STIEGLER 1999, S. 150 ff.). Die Gliederung des Lastenhefts orientiert sich dabei an spezifischen Gesichtspunkten, so erfolgt bei der Beschaffung von Karosseriebauanlagen in der Regel eine getrennte Beschreibung mechanischer und elektrotechnischer Umfänge. Aufgrund der besonderen Bedeutung werden die Lastenheftinhalte im Kontext des automobilen Karosseriebaus in Abschnitt 2.4.3 dieser Arbeit detailliert erläutert.

Die Ausschreibungsunterlagen bestehen im Wesentlichen aus dem Lastenheft, das um ein Begleitschreiben erweitert wird. Die Auswahl der geeigneten potentiellen Lieferanten erfolgt anhand unterschiedlicher Kriterien und führt zu einer, für einen spezifischen Beschaffungsprozess angefertigten, Lieferantenliste. In der Phase der Angebotserstellung sind in erster Linie die Lieferanten aktiv und erstellen ihre Angebote. In dieser Phase ist der Dialog zwischen Lieferanten und Auftraggeber von großer Bedeutung, um etwaige Unklarheiten in den Ausschreibungsunterlagen auszuräumen und vergleichbare Angebote zu erhalten. Der Angebotsvergleich dient der Entscheidungsvorbereitung durch die Entwicklung einer Vergabeempfehlung. Der Vergleich der Angebote berücksichtigt in der betrieblichen Praxis die Kriterien Erfüllungsgrad der Anforderungen des Lastenheft-



---

tes, Qualität von Komponenten und Ausführung bzw. Montage, Referenzanlagen, Kompetenz und Größe des potentiellen Lieferanten, eigene Erfahrungen und Angebotspreis (STIEGLER 1999, S. 155 ff.). Abschließend wird auf Basis der Empfehlung eine Entscheidung für einen Lieferanten getroffen und die finalen Vergabeverhandlungen geführt. Deren Ergebnis ist ein festes Vertragsverhältnis mit einem Lieferanten.

### **Feinplanung und Konstruktion**

Die Feinplanung und Konstruktion ist in der Regel Hauptaufgabe der Lieferanten. Die Planungsabteilung des Automobilherstellers ist für die Überwachung des Fortschritts zuständig und direkter Ansprechpartner des Lieferanten. Der Planungsschritt beginnt 20 MvS und endet 15 MvS. Ausgehend von den Ergebnissen der Detailplanung, dem Spann- und Fixierkonzept sowie der Projektprämissen erfolgt die Konstruktion sequentiell für die mechanischen Bauteile und die elektrischen Komponenten und deren Verdrahtung. Ergebnisse dieser Aktivitäten sind Bauteilzeichnungen und Schaltpläne. Parallel zur Konstruktion erstellt der SPS Programmierer die benötigten Steuerungsprogramme, mit welchen später die Produktionszellen gesteuert werden. Anschließend erfolgt die Fertigung und Vormontage der Komponenten und Baugruppen. Weiterer wesentlicher Inhalt der Phase ist die Beschaffung der Kaufteile für den Anlagenaufbau. Hierbei werden Komponenten, die in Kaufteillisten definiert sind, direkt durch den Anlagelieferanten beschafft. Erfolgt die Bestellung durch den Auftraggeber, spricht man von Beistellumfängen. Die konkrete Ausplanung des Anlagenaufbaus ist ebenfalls Bestandteil der Feinplanung und umfasst die Erstellung von Baustellenplänen und Terminplänen für den Aufbau.

### **Anlagenaufbau**

14 MvS beginnt der Anlagenaufbau, dieser sollte 9 MvS abgeschlossen sein. Die zuvor gefertigten und bestellten Komponenten werden unter Berücksichtigung der Baustellen- und Terminpläne aufgebaut. Hierfür ist der Lieferant zuständig, die Baustellenleitung wird durch den Automobilhersteller übernommen. Die Planungsabteilung, speziell der Mechanik- und Elektrikplaner, überwachen den Fortschritt. Ergebnisse des Anlagenaufbaus sind die mechanisch und elektrisch aufgebauten Anlagen.

### **Inbetriebnahme**

Die Inbetriebnahme beinhaltet zahlreiche Produktionstests und findet im Zeitraum von 8 bis 1 MvS statt. Der Zulieferer ist für die Funktionsfähigkeit der Anlage zuständig. Auf Seiten des Automobilherstellers sind Qualitätsverantwortliche, meist die Prozessplaner, sowie Elektrikplaner anwesend. Die Roboter-Offline-Programme aus der Detailplanung werden auf der Baustelle durch den Roboter-Online-Programmierer geprüft, notwendige Änderungen durchgeführt und die Kommunikation zu weiteren Anlagenkomponenten erstellt. Parallel zu den Aktivitäten in der Robotik vervollständigt der verantwortliche SPS-Programmierer das Grundprogramm aus der Feinplanung.

Die beiden oben genannten Schritte liegen einem iterativen Verfahren zugrunde und werden nach jedem Produktionstest wiederholt, bis eine funktionsfähige Anlage mit vorgegebener Taktzeit und Verfügbarkeit erreicht wird. Bei den Produktionstests werden folgende Abschnitte unterschieden: Initial wird der sogenannte Handbetrieb, auch Tippbetrieb, erstellt. Die Fertigungszelle läuft hier noch nicht automatisiert, jeder Schritt muss per Hand bestätigt werden. Wenn die Funktionstauglichkeit sichergestellt ist, erfolgt die Programmierung des Automatikbetriebs. Ein wichtiger Meilenstein bei der Anlageninbetriebnahme ist der sogenannte Ghost-Run. Dabei wird die Anlage im Automatikbetrieb gefahren, ohne dass Bauteile im System vorhanden sind. Sensorabfragen werden bei dieser Betriebsart über das Steuerprogramm geschaltet. Dieser Betriebsmodus erlaubt es, den zeitlichen Ablauf der Produktionsschritte und das Zusammenwirken der beteiligten Komponenten zu prüfen. In den folgenden Leistungs- und Qualitätstests werden Bauteile in die Anlage eingebracht und in mehreren Iterationsstufen die Anlagenleistung und die Produktqualität in Bezug auf Maß und Güte der Fügestellen optimiert. In der Endphase der Inbetriebnahme erfolgt zudem die Einweisung der Produktionsmitarbeiter in die neue Anlagentechnik. Die Inbetriebnahme wird vornehmlich durch den Lieferanten durchgeführt und durch die Planungs- und Qualitätsverantwortlichen des Automobilherstellers begleitet.

### **Serienübergabe**

Die Serienübergabe findet ca. 3 Monate nach dem Start-of-Production (MnSOP) unter Beteiligung des Lieferanten sowie der Planungs- und Produktionsverantwortlichen statt und bildet den Abschluss des Planungsprozesses. Nach der endgültigen Abnahme durch den Auftraggeber erfolgt der Verantwortungsübergang vom Lieferanten zum Betreiber. Mit der Endabnahme garantiert der Zulieferer

---

die Prozessqualität und die Vorgaben (Taktzeit und Verfügbarkeit) erfüllt zu haben und gibt eine umfassende Konformitätserklärung ab. Mit der abschließenden Dokumentation ist der kaufmännische Projektabschluss erreicht, der Betreiber ist ab diesem Punkt der Inhaber der Anlage.

### **2.4.3 Projektspezifische Standardisierung der Anlagentechnik**

Die Anlagentechnik des Karosseriebaus ist in der deutschen Automobilindustrie durch einen hohen unternehmens- und projektspezifischen Standardisierungsgrad gekennzeichnet (MELING 2009, MELING 2010). Unter Standardisierung ist dabei die Vereinheitlichung der eingesetzten Komponenten, der technischen Lösungskonzepte und der zugehörigen Planungs- und Konstruktionsprozesse zu verstehen. Die Standardisierung von Planungsprozessen wird im Folgenden nicht betrachtet.

#### **Motivation**

Ziel der Standardisierung ist die Erreichung von Vorteilen in Bezug auf Kosten, Zeit und Qualität über den gesamten Lebenszyklus von Produktionsanlagen. Positive Effekte sind bei der Anlagenplanung und Inbetriebnahme aber auch während der Betriebsphase realisierbar. Grundsätzlich erlaubt eine projektspezifische Standardisierung eine aufwandsreduzierte Beherrschung komplexer Technik, wie sie im Bereich des automobilen Karosseriebaus zur Anwendung kommt.

Das Grundprinzip der Standardisierung, der weitgehende Einsatz einheitlicher Lösungen und Komponenten, erlaubt eine intensivere Analyse, Test und Absicherung der eingesetzten Komponenten aufgrund der geringeren Variantenzahl. Die gesteigerte Qualität und Funktionssicherheit der Einzelkomponenten führt im Anlagenverbund zu einer erhöhten Qualität des Gesamtsystems. Des Weiteren ermöglicht die Standardisierung von Komponenten und Teillösungen eine Konzentration auf die wesentlichen produktspezifischen Planungsaufgaben. Eine gesteigerte Qualität der Planungsergebnisse kann so erreicht werden.

Im Bereich der Betriebskosten zielt die Standardisierung einerseits auf Vorteile durch eine einfache, weil einheitliche, Systembedienung ab. Der Instandhaltungs- und Störbehebungsaufwand sinkt durch die Anwendbarkeit einheitlicher Störbehebungsstrategien und der reduzierten Systemkomplexität. Idealerweise ist die in einem Karosseriebau an einem Standort eingesetzte Anlagentechnik so vereinheitlicht, dass eine zentrale Instandhaltungseinheit übergreifend für mehrere Pro-

duktionsbereiche verantwortlich ist. Andererseits können durch eine standardisierte Anlagentechnik erhebliche Vorteile im Bereich des Ersatzteilmanagements durch geringere Bestände aufgrund reduzierter Variantenvielfalt und zentrale Bereitstellung und Verwaltung für größere Produktionsbereiche erzielt werden (REICHEL 2009, S. 39).

Ein weiterer Vorteil der projektspezifischen Standardisierung ist die Reduzierung der Investitionskosten. Dieser wird durch drei Effekte realisiert. Die Konstruktions-, Montage- und Inbetriebnahmeaufwände sinken durch die Vereinheitlichung der Anlagentechnik (LANGMANN 2004, S. 55). Der interne und externe Planungsaufwand wird durch die Verwendung abgesicherter Lösungsmodule und Komponenten erheblich reduziert. Wesentlicher und kostenwirksamer Vorteil ist die Möglichkeit zu Bündelungen im Komponenten- und Systemeinkauf. Durch die Vereinheitlichung der Anlagentechnik können über die Zusammenfassung der Bedarfe über mehrere Projekte in einem bestimmten Zeitabschnitt größere Einkaufspakete gebildet werden. Dies ermöglicht die Nutzung von Skaleneffekten bei externen Lieferanten und damit die Reduzierung der Beschaffungskosten (BUNDESVERBAND MATERIALWIRTSCHAFT 2008, S. 140).

### **Standardisierungsprozess**

Der Standardisierungsprozess lässt sich in die drei Hauptphasen Identifikation, Standarderstellung und Roll-Out einteilen und wird projekthaft organisiert (siehe Abbildung 10).

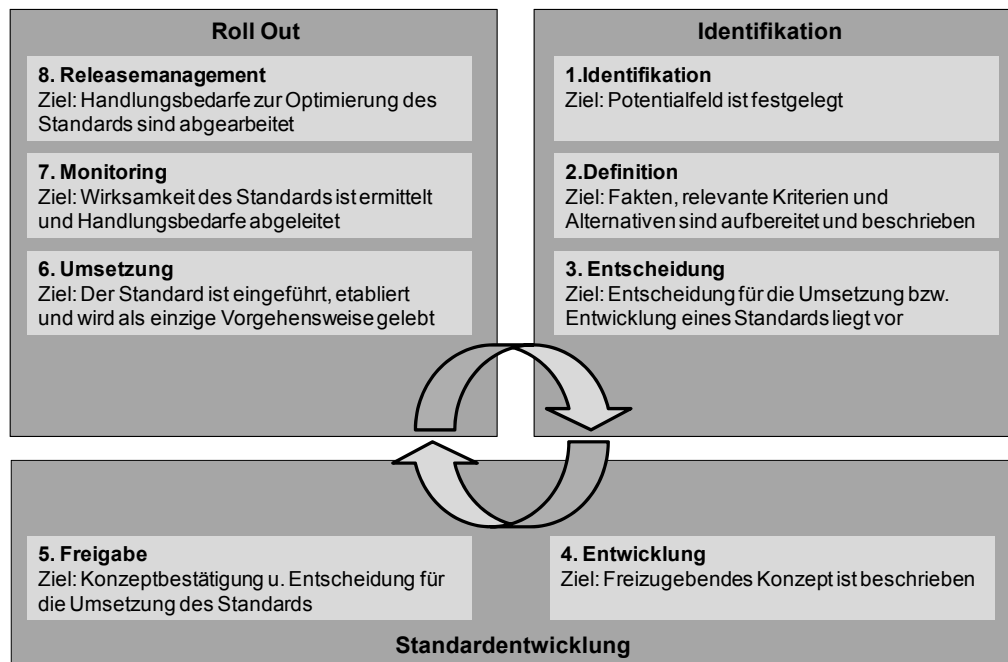


Abbildung 10: Vorgehen Standardisierung (BMW 2007)

In der Identifikationsphase werden relevante Potentialfelder für eine Standardisierung erkannt. Unter Berücksichtigung der Einflussgrößen, eingesetzte Technik, neue Anforderungen, technische Entwicklung, Innovationsstrategie und geplantes Investitionsvolumen, wird eine Liste der für eine Standardisierung relevanten Komponenten und Themen erstellt. Anschließend werden die Entscheidungskriterien definiert, die relevanten Informationen zu den Potentialfeldern aufbereitet und konkrete Skizzen für die Standardisierungsprojekte erarbeitet. Diese Skizzen beschreiben die geplante Standardisierungsmaßnahme, die Wirksamkeit, Potentiale und notwendigen Aufwände. Ausgehend von diesen Skizzen wird in der anschließenden Entscheidung festgelegt, für welche Potentialfelder im Folgenden eine Standardisierung durchgeführt werden soll.

Die zweite Hauptphase ist die Standarderstellung, die in die Aspekte Entwicklung und Freigabe gegliedert ist. Im Rahmen der Entwicklung wird für das Potentialfeld eine einheitliche Lösung definiert. Ausgehend von möglichen Lösungsalternativen wird ein Konzept ausgewählt und spezifiziert. Neben der technischen Beschreibung werden Lieferbedingungen und kaufmännische Vereinbarungen mit Lieferanten getroffen. Ist das technische Konzept bestätigt, die technischen Spezifikationen erstellt und die kaufmännischen Verhandlungen zur Festlegung von definierten Beschaffungskonditionen wie Preis und Lieferbedin-

gungen abgeschlossen, erfolgt die Freigabe des Standards. In diesen Freigabeprozess sind in der Regel alle betroffenen Fachabteilungen des Unternehmens integriert, um eine möglichst breite Akzeptanz der standardisierten Lösung zu erreichen.

Die anschließende Roll-Out-Phase beinhaltet die Teilabschnitte Umsetzung, Monitoring und Releasemanagement. Unter Umsetzung wird die Nutzung eines Standards in einem oder mehreren konkreten Anlagenprojekten verstanden. Das Monitoring umfasst die begleitende Überwachung der Umsetzung und des produktiven Betriebs einer Lösung. Dabei wird die Wirksamkeit geprüft und Handlungsbedarfe abgeleitet. Im Rahmen des Releasemanagements werden diese Handlungsbedarfe aufgenommen und die Standardlösung optimiert bzw. Neuentwicklungen, die eine erneute Identifikationsphase erfordern, angestoßen. Zudem ist in der Phase des Releasemanagements die Verwaltung unterschiedlicher Versionen von Bauteilen oder Software eine wesentliche Aufgabe.

### **Dokumentation und Verwaltung von Standards**

Die Beschreibung eines Standards erfolgt über eine Reihe von Dokumenten, die in die Kategorie technische Spezifikation und kaufmännische Vereinbarungen eingeordnet werden können.

Kerndokument der technischen Spezifikation ist dabei eine sogenannte Freigabeliste, welche die zugelassenen Komponenten bzw. Komponentengruppen eindeutig über Artikelnummer, Versionsangabe und Beschreibung definiert. Ergänzend wird in einer Konzeptbeschreibung näher erläutert wie die Komponente einzusetzen ist. Neben einer textuellen Darstellung dienen vor allem Skizzen und Konstruktionsbeispiele einer detaillierten Beschreibung. Die Konstruktionsbeispiele sind dabei häufig Templates für die mechanische und elektrotechnische Konstruktion und Programmbausteine für die steuerungstechnische Integration. Die kaufmännischen Vereinbarungen fixieren einen oder mehrere zugelassene Lieferanten und legen die Konditionen, zu denen die Beschaffung erfolgen kann, fest.

Die Verwaltung der anlagentechnischen Standards erfolgt in Unternehmen im Allgemeinen durch eine zentrale Stelle, die in der Regel der Planungsabteilung zugeordnet ist. Die Bereitstellung der Standarddokumente findet dabei für interne und externe Partner heute in Online-Datenbanken statt, die eine geordnete Verwaltung und ein Versionsmanagement ermöglichen. Die Sortierung ist weitgehend themenbezogen, wobei eine Trennung in die für die Anlagentechnik rele-

---

vanten Fachdisziplinen Mechanik inklusive Pneumatik, Elektrotechnik und Steuerungssoftware vorgenommen wird. Unterschieden wird zudem zwischen extern verfügbaren Informationen und nur unternehmensintern zugänglichen Daten. Beispiele für solche Daten sind vertrauliche Vereinbarungen mit Lieferanten oder strategische Entscheidungsgrundlagen.

### **Nutzung von anlagentechnischen Standards in Projekten**

Die Integration von anlagentechnischen Standards in Projekten erfolgt in mehreren Phasen des Planungsablaufs. Dabei reduzieren existierende Standards die Planungsaufwände durch die Bereitstellung abgesicherter Lösungen erheblich. Die größte Wirksamkeit besitzt die Standardisierung der Anlagentechnik aber in den Phasen Feinplanung bzw. Konstruktion, Beschaffung, Anlagenaufbau und Inbetriebnahme.

In der Konzept- und Grobplanungsphase werden, soweit möglich, standardisierte Lösungskonzepte zum Einsatz gebracht. Diese konzeptionellen Ansätze basieren dabei häufig auf existierenden Anlagen und ermöglichen eine Planung auf Basis bereits in der Realität bestätigter Kenngrößen hinsichtlich Leistungsfähigkeit und notwendigem Investitionsvolumen. In der Detailplanung wird ebenfalls auf Erfahrungswerte und bestätigte Kenngrößen zurückgegriffen.

In der Beschaffungsphase stellen die Standards einen Kernbestandteil des Lastenhefts für die Angebotseinholung dar. Abbildung 11 zeigt die wesentlichen Elemente eines Lastenhefts. Der technische Abschnitt spezifiziert dabei die zu beschaffende Anlage und ist für jeden Beschaffungsvorgang individuell zu erstellen. Typischerweise setzt sich die technische Beschreibung aus den Aspekten allgemeine Beschreibung, Aufgabenstellung und Prozessbeschreibung, Qualitätsziele, Layoutskizzen, technische Beschreibung Mechanik und Elektrik sowie Terminpläne und Abnahmemodalitäten zusammen.

Im allgemeinen Abschnitt des Lastenhefts werden die für den jeweiligen Beschaffungsvorgang gültigen übergeordneten Festlegungen beschrieben. Diese sind in der Regel allgemeingültige oder branchenspezifische Normen und unternehmensinterne bzw. projektspezifische Standards. Die im Rahmen der Standardisierung getroffenen und dokumentierten Festlegungen auf bestimmte Techniken, Konzepte und Komponenten werden in der Beschaffungsphase direkt in den allgemeinen Abschnitt des Lastenhefts übernommen.

Allgemeine Details, die die kaufmännische Abwicklung betreffen, werden im kaufmännischen Abschnitt des Lastenhefts definiert. Hinweise zur Angebotserstellung, zur Ausweisung von Kosten und zu Zahlungsmodalitäten werden festgelegt. Falls im Rahmen der Standardisierung definierte Einkaufspreise für Komponenten und Systeme mit den Herstellern vereinbart wurden, so ist im kaufmännischen Abschnitt die Vorgehensweise für die Komponentenbestellung und Kostenverrechnung spezifiziert.

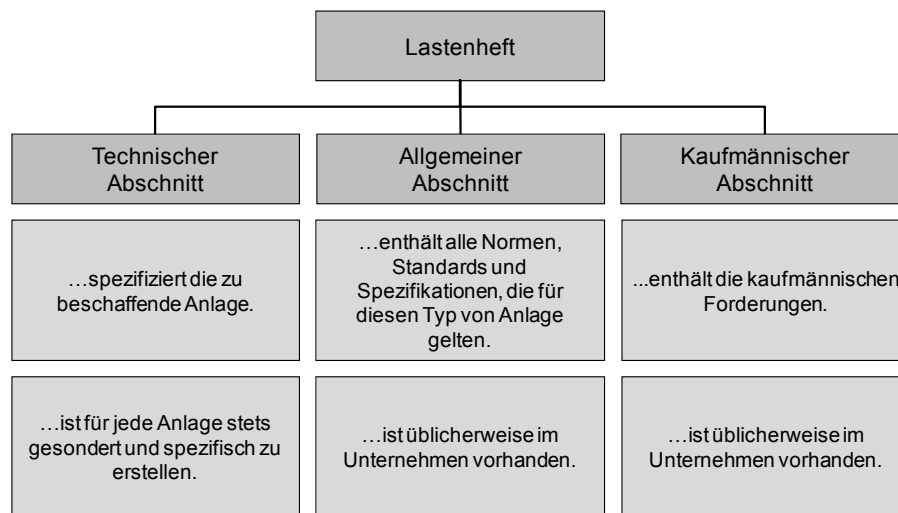


Abbildung 11: Bestandteile Lastenheft (STIEGLER 1999, S. 150)

In der Feinplanungsphase und Konstruktion dienen die anlagentechnischen Standards als Grundlage und Richtlinien für die Detaillierung der Anlagenkonzepte in den Fachdisziplinen Mechanik, Elektrik und Steuerungssoftware (EHRENSTRASSER 2010). Dabei ist der Lösungskorridor durch die Vorgaben des Standards in der Mechanik deutlich weniger eingeschränkt als in der Elektro- und Steuerungstechnik.

In der Montage und Inbetriebnahme wirken die anlagentechnischen Standards indirekt über die Konstruktionsvorgaben und direkt über definierte Ausführungsbestimmungen, die im Rahmen der Standardisierung festgelegt wurden. Eine Vermeidung typischer Fehler und eine Reduzierung von Anlaufschwierigkeiten können so erreicht werden.

### Zyklizität von Standards

Die heute in der Automobilindustrie eingesetzten Standards für Anlagentechnik sind keine statischen Systeme, sondern unterliegen zyklischen Veränderungen.



---

Die Modifikation erfolgt dabei in der Regel evolutionär, also auf Basis des Bestehenden, wobei die Entwicklungssprünge unterschiedlich groß sind, je nachdem welche Komponentendefinition in einem Standard verändert wird. Grundsätzlich gilt, dass die Größe des Entwicklungssprungs mit der funktionalen Bedeutung der geänderten Komponente und der zugehörigen Anzahl der Wirkbeziehungen im Anlagenverbund korreliert. Umfassende Veränderungen werden in der Regel in ähnlichen zeitlichen Abständen zu neuen Standardgenerationen gebündelt und mit der Investitionsplanung des Unternehmens synchronisiert.

Hierbei ist eine Vielzahl von Ursachen für die Veränderung anlagentechnischer Standards verantwortlich. Wesentlich sind in diesem Kontext neue Anforderungen an die Produktionstechnik. Von Seiten der Produktentwicklung werden diese in erster Linie durch neue Materialien, Fertigungs- und Montageprozesse bedingt. Zusätzlich entstehen neue Anforderungen aus veränderten Produktionskonzepten. Beispiele hierfür sind Taktzeitvorgaben, notwendige Verfügbarkeiten oder Vorgaben für Instandhaltungskosten. Als Konsequenz veränderter Anforderungen kann eine Anpassung der anlagentechnischen Standards erforderlich sein. Neben den anforderungsbedingten Standardänderungen können auch strategische Vorgaben der Einkaufsabteilung einen Evolutionsschritt notwendig machen. So kann der strategische Aufbau von Lieferanten, mit dem Ziel, langfristig eine positive Marktsituation zu erreichen, häufig nur durch eine schrittweise Eingliederung in bestehende Standards realisiert werden (BÜSCH 2007, S. 240). Ein weiteres Beispiel für eine strategisch motivierte Änderung des Standards kann eine Absicherung gegen Währungsschwankungen durch gezielte Lieferantenauswahl sein.

Neben den genannten Ursachen für die inhärente Dynamik anlagentechnischer Standards spielen die Innovationszyklen der eingesetzten Komponenten und Systeme eine wichtige Rolle. Diese Zyklen beschreiben die Zeitdauer von der Markteinführung einer Komponente bis zu deren Abkündigung und Ersatz durch ein Nachfolgeprodukt (STREBEL 2007, S. 61). Hierbei sind vor allem informationstechnische bzw. mechatronische Komponenten relevant, da deren Zyklen wesentlich kürzer sind als die rein mechanischer Komponenten. Insbesondere die Kommunikationstechnik, die in der modernen Automatisierungstechnik weitgehend über Ethernet-basierte Feldbusprotokolle realisiert wird, und PC-basierte Systeme wie Leittechnik, Prozesssteuerung und -überwachung, Robotersteuerungen und Visualisierungsrechner unterliegen diesen schnellen Veränderungen. Der Einzug der konventionellen IT-Systeme in die Produktionsautomatisierung führt zudem zu einem Bedeutungsgewinn von Security Aspekten. Die Gefahren von

Schadsoftware oder unberechtigten externen Zugriffen erfordern eine fortlaufende Aktualisierung und Abschirmung der automatisierten Produktionssysteme in der Betriebsphase und erzeugen so eine zusätzliche Dynamik in der Standardisierung automatisierter Betriebsmittel.

### **2.5 Aktuelle Herausforderungen**

Die Automobilindustrie steht aktuell vor großen Herausforderungen, die durch drei wesentliche übergeordnete Entwicklungen begründet werden. Die Globalisierung zwingt Unternehmen dazu, ihre Produktivität zu steigern, um in einem verschärften weltweiten Wettbewerb bestehen zu können. Die Vorteile ausländischer Produktionsstandorte liegen dabei in der Regel im Bereich der Fertigungskosten, die durch niedrige Lohnstückkosten und geringerer Aufwendungen in indirekten Bereichen positiv beeinflusst werden (BECKER 2007, S. 54).

Des Weiteren steigt insbesondere im sogenannten Premiumsegment die Notwendigkeit der kundenspezifischen Diversifikation der Produkte. Zusätzliche Marktanteile können häufig nur über speziell auf Kundenbedürfnisse abgestimmte Fahrzeugmodelle erschlossen werden (WALLENTOWITZ ET AL. 2009, S. 15).

Zudem steht die Automobilindustrie aktuell vor einem signifikanten Veränderungsprozess. Etablierte, auf konventionellen Verbrennungsmotoren basierende Antriebskonzepte werden in den nächsten Jahren durch zusätzliche Lösungsansätze wie Brennstoffzellen, Hybrid, Plug-In-Hybrid und Elektroantrieb ergänzt oder ersetzt werden (WALLENTOWITZ ET AL. 2010, S. 2).

Die beschriebenen Entwicklungen haben eine Reihe von Konsequenzen für die Fahrzeugproduktion. Unternehmen steigern die Anzahl der zu produzierenden Fahrzeugmodelle und -derivate. Die spezifischen Produktlebenszyklen werden dabei teilweise verkürzt, um eine häufigere Reaktion auf marktbezogene Anforderungen zu ermöglichen (BECKER 2007, S. 75). Vor diesem Hintergrund gewinnt die Notwendigkeit kurzer Time-to-market-Kennzahlen zusätzlich an Bedeutung. Zudem sind verstärkt neue Materialien und Technologien bei der Fahrzeugproduktion zu berücksichtigen, um neue Antriebskonzepte realisieren und marktseitige Anforderungen erfüllen zu können (BRAESS 2007, S. 382). Der globale Wettbewerbsdruck zusammen mit den notwendigen Entwicklungsleistungen für neuartige Antriebskonzepte erfordert darüber hinaus deutliche Produktivitätssteigerungen (BECKER 2007, S. 86).

---

Die wesentlichen Auswirkungen dieser Entwicklungen für die Anlagentechnik des Karosseriebaus werden im Folgenden vorgestellt. Aufgrund der steigenden Anzahl von Modellvarianten und -derivaten ist es notwendig, die entsprechenden Karosserietypen gemeinsam auf wenigen Haupt- und Nebenlinien zu fertigen. Die dazu notwendigen modell- und typflexiblen Produktionsanlagen sind durch häufige Integrationsprozesse charakterisiert. Ist eine Integration neuer Produktvarianten nicht möglich, kann eine Senkung der modellspezifischen Investitionskosten durch eine Wiederverwendung bestimmter Komponenten und Teilsysteme der Anlagentechnik erreicht werden. Beide Ansätze werden in den folgenden zwei Abschnitten erläutert.

### **2.5.1 Integration neuer Fahrzeugmodelle**

In zunehmendem Maße spielen neben der Neuplanung von Produktionsanlagen auch Integrationen eine immer bedeutendere Rolle in der Karosseriefertigung. Durch zahlreiche Derivate auf derselben Produktionslinie, oder der Planung eines Nachfolgers auf der gleichen Linie, werden verstärkt Rekonfigurations- und Integrationsmaßnahmen auf bereits vorhandenen Anlagen durchgeführt. Während heute nur etwa 30% der Anlagentechnik eines Karosseriebaus bei der Einführung eines neuen Modells integriert wird, steigt dieser Anteil in Zukunft laut Experten auf bis zu 60-70% an (MELING 2009). Charakterisiert sind Integrationsprozesse durch die Veränderung oder den Ersatz bestehender und das Hinzufügen neuer Komponenten zum existierenden Anlagenverbund. Die Modifikation von Bestandskomponenten und -systemen umfasst dabei sowohl physische Änderungen als auch die funktionale Anpassung mittels neuer Steuerungsprogramme. Notwendig sind Maßnahmen in erster Linie aufgrund neuer Anforderungen an die Produktionsanlagen. Unterschieden wird dabei in Anforderungen, die von Produktseite gegeben sind, wie beispielsweise veränderte Fügeprozesse für neue Materialien, oder produktionsseitig begründet sind. Beispiele hierfür sind neue Anforderungen hinsichtlich Taktzeit, Verfügbarkeit oder Personensicherheit.

Ziel der Integrationsprozesse ist die Senkung der modellspezifischen Investitionskosten im Karosseriebau, da nur Teile der notwendigen Anlagentechnik neu beschafft werden. Zusätzlich lässt sich eine längere Nutzungsdauer der Komponenten erreichen. So kann eine möglichst vollständige Ausnutzung des investierten, komponentenspezifischen Nutzungspotentials erzielt werden. Während Anlagen früher nur für einen Produktzyklus, der ca. 7-8 Jahre umfasst, ausgelegt

waren, wird mittlerweile das Ziel verfolgt, bis zu zwei Produktzyklen, d. h. bis zu 16 Jahren Komponentennutzung zu realisieren.

Es existiert eine Reihe von Aspekten die einer vermehrten Durchführung von Integrationsprozessen entgegenstehen. So ist die Planung und Umsetzung von Integrationsprozessen durch eine hohe Komplexität geprägt. Diese ist durch die Restriktionen aufgrund vorhandener Anlagentechnik und -strukturen gegeben. Freiheitsgrade in der Planung sind eingeschränkt, da ein möglichst geringes Maß an Rekonfiguration bestehender Systeme erreicht werden soll. Zusätzlich ist es notwendig, die Integrationsmaßnahme mit der laufenden Produktion zu synchronisieren. Dies hat zur Folge, dass die Planungs-, und vor allem die Realisierungsphase, bei Integrationsmaßnahmen häufig mehr Zeit in Anspruch nimmt als dies bei Neuanlagen der Fall ist. Die heterogene Systemtechnik ist bei Integrationsprojekten eine weitere Herausforderung. Altsysteme, die häufig in der Betriebsphase modifiziert wurden, müssen für neue Produktionsfunktionen verändert und mit neuen Komponenten und Systemen kombiniert werden. Die nicht gegebene Kompatibilität der Systeme ist dabei eines der wesentlichen Probleme für die operative Planung und Umsetzung von Integrationsprojekten (REINHART ET AL. 2009).

Die aktuell in der Automobilindustrie existierenden Referenzprozesse für die Standardisierung, Planung und Realisierung von Anlagen sind für die Erstellung neuer Produktionssysteme entwickelt und optimiert worden. Die definierten Workflows, organisatorischen Strukturen, Methoden und Werkzeuge sind nur eingeschränkt für die Integration neuer Produkte in bestehende Anlagen geeignet.

### **2.5.2 Wiederverwendung von Anlagentechnik**

Neben der Integration neuer Modelle in existierende Anlagen ist ein weiterer Trend in der Anlagentechnik des automobilen Karosseriebaus zu verzeichnen, der in den aktuellen Herausforderungen für die Automobilproduktion begründet ist. Dieser wird unternehmensintern als Wiederverwendung von Anlagentechnik (WivAT) oder als Warehouse Concept bezeichnet (MELING 2009, MELING 2010). Kern des Ansatzes ist der Einsatz von Altkomponenten für den Aufbau neuer Produktionsanlagen. Initialer Schritt des Vorgehens ist dabei die Analyse der im Unternehmen verfügbaren Altkomponenten. Dabei werden Systemzustand, erwartete bzw. garantierte Lebensdauer, verfügbare Mengen und mögliche Einsatztermine untersucht. Anschließend findet ein Bedarfsabgleich mit geplanten Projekten und die Ableitung konkreter Wiederverwendungsszenarien sowie deren

---

Umsetzung statt. Dabei erfolgt nach dem Rückbau der Altanlagen in der Regel eine Aufbereitung der wiederzuverwendenden Komponenten und Systeme, gegebenenfalls eine Einlagerung und Verbringung zum neuen Verbauort.

Ziel der Wiederverwendung von anlagentechnischen Komponenten ist, wie bei Integrationsprojekten, die Reduzierung der modellspezifischen Investitionskosten. Erreicht werden kann dies durch eine verbesserte Ausnutzung der erreichbaren Einsatzdauer geeigneter Betriebsmittel. Insbesondere Komponenten, deren spezifische maximale Nutzungsdauer wesentlich größer ist als die typischen Produktionszyklen von Fahrzeugmodellen, werden bei diesem Vorgehen berücksichtigt.

Ein wesentlicher Nachteil von Integrationsprojekten, die starken Restriktionen in der Planung, ist bei Wiederverwendungsansätzen auf Komponenten und Subsystemebene nicht gegeben. Die Freiheitsgrade hinsichtlich Materialfluss und Taktzeit, bestimmt durch Anlagenstandort und -layout, sind vergleichbar denen bei Neuplanungen. Ein weiterer Vorteil von Wiederverwendungsprojekten ist die Möglichkeit, komponentenindividuell über einen erneuten Einsatz entscheiden zu können. Die prognostizierte Lebensdauer und die spezifische Nutzungshistorie können so in Betracht gezogen werden.

Dem Vorteil der relativ geringen Einschränkung bei der Planung steht eine Reihe von Nachteilen entgegen. So ist bei Wiederverwendungsprojekten ein erhöhter Aufwand für den Anlagenrückbau, die Komponentenaufbereitung und Zwischenlagerung zu berücksichtigen. Zudem konzentriert sich die Wiederverwendung in der Regel auf wenige Teile, die ein relativ großes Investitionsvolumen implizieren, um eine Beherrschbarkeit des Prozesses zu gewährleisten. Im Vergleich zu Integrationsprojekten sind die maximal erzielbaren Investitionseinsparungen auf den Einkaufswert der wiederverwendeten Komponenten limitiert. Des Weiteren kommt es bei der Wiederverwendung auf Komponentenebene zu einer stärkeren Vermischung von Systemen, die eine nicht ausreichende Kompatibilität aufweisen. Die nicht gegebene Kompatibilität ist eine der wesentlichen Herausforderungen bei der operativen Planung und Umsetzung des Wiederverwendungsansatzes (REINHART ET AL. 2009).

### 2.6 Fazit

Kapitel 2 dieser Arbeit erläutert die Grundlagen des automobilen Karosseriebaus und zeigt neben der produktionsbezogenen Eingliederung die Ausprägung der eingesetzten Anlagentechnik sowie die typischen Vorgehensweisen der Planung. Zusätzlich werden aktuelle Herausforderungen vorgestellt und diskutiert. Hierbei lässt sich feststellen, dass die Anlagentechnik vor einer Reihe von Herausforderungen steht, die fundamental durch die übergeordneten Entwicklungen und Trends in der Automobilindustrie impliziert werden. Wesentliche Konsequenz ist die Notwendigkeit, die modellspezifischen Investitionen signifikant zu senken.

Zwei Ansätze dabei sind die Integration neuer Fahrzeugmodelle in existierende Produktionsanlagen und die Wiederverwendung von Komponenten bei der Errichtung neuer Produktionsanlagen. Obwohl sich beide Ansätze in einigen Aspekten, wie beispielsweise den zusätzlichen Restriktionen in der Planung, deutlich unterscheiden, ist doch eine Reihe von Gemeinsamkeiten feststellbar. Prinzipiell handelt es sich bei beiden Maßnahmen um die Rekonfiguration einer Produktionsanlage. Unterschieden werden beide Ansätze durch den Grad der Rekonfiguration. Dieser ist bei der Wiederverwendung auf Komponentenebene wesentlich höher als bei Integrationsprojekten.

Konsequenz dieser Entwicklung ist die zunehmende Notwendigkeit automatisierungstechnische Komponenten und Subsysteme, die unterschiedlichen technischen Generationen entstammen oder ursprünglich andersartige Einsatzzwecke besaßen, in einer Anlage zu rekombinieren. Hierbei ist eine mangelnde Kompatibilität, also eine eingeschränkte Fähigkeit der Systeme notwendige Daten auszutauschen und so koordiniert im Verbund Produktionsfunktionen zu realisieren, wesentliches Hemmnis und verhindert heute häufig die wirtschaftliche Umsetzung von Integrations- und Wiederverwendungsprojekten. Die aktuell eingesetzten technischen Konzepte und Planungsmethoden in der Automobilindustrie, die weitgehend auf die Erstellung neuer Produktionsanlagen ausgerichtet sind, genügen diesen neuen Anforderungen nur unzureichend.

---

## **3 Stand der Technik**

### **3.1 Allgemeines**

Nach den Grundlagen des automobilen Karosseriebaus und den aktuellen Herausforderungen erfolgt im dritten Kapitel dieser Arbeit die Diskussion relevanter Vorarbeiten und Lösungsansätze im Themenfeld der Rekonfiguration von Anlagen aus Wissenschaft und praktischer Anwendung. Dabei werden zum einen Grundlagen zum Thema Wandlungsfähigkeit vorgestellt und davon ausgehend Ansätze für die Schnittstellengestaltung bei Betriebsmitteln behandelt. Zum anderen werden relevante Ansätze für die Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen vorgestellt. Abschließend werden Defizite identifiziert und Handlungsfelder abgeleitet.

### **3.2 Wandlungsfähigkeit als Gegenstand der Forschung**

Wandlungsfähigkeit als Systemeigenschaft wird in der Forschungslandschaft aber auch in der betrieblichen Praxis zunehmend diskutiert und hat sich in den zurückliegenden Jahren als Zielgröße für Planungsprozesse und Systemgestaltung etabliert. Im Folgenden werden die wesentlichen relevanten Aspekte des Forschungsbereichs Wandlungsfähigkeit erläutert.

#### **3.2.1 Unternehmen im turbulenten Umfeld**

Das Umfeld von Unternehmen ist durch eine gesteigerte Anzahl und Vernetzung von lokalen und globalen Akteuren gekennzeichnet. Dies führt zu einer eingeschränkten Prognostizierbarkeit zukünftiger Entwicklungen und einer schwieriger werdenden Beherrschbarkeit von Veränderungsprozessen (MILBERG 2000, SPATH & BAUMEISTER 2001, SPATH & SCHOLTZ 2007, DOVE 2001). CHAKRAVARTHY bezeichnet dieses unternehmerische Umfeld als turbulent (1997).

Die Faktoren mittels derer das Umfeld auf eine Produktion einwirkt aggregiert MÖLLER zu einem Rezeptormodell (2008, S. 23). Rezeptoren sind dabei Einflussgrößen über die das Umfeld die Produktion beeinflusst. Der Rezeptor Produkt bzw. Produktvarianten beschreibt dabei die Erzeugnisse der Produktion.

Stückzahl beschreibt die Menge der Erzeugnisse in einem Zeitintervall. Unter Zeit ist die Spanne zwischen Bedarfsentstehung und Bedarfsbefriedigung durch Produktion zu verstehen. Ändern sich die Kosten für Produktionsfaktoren wirkt der Rezeptor Kosten. Qualität beschreibt die Güte der erstellten Produkte. Der Rezeptor Technologie definiert die verfügbaren und zulässigen Verfahren und Ressourcen für die Leistungserbringung.

Als eine Antwort auf dieses turbulente Umfeld wird in der wissenschaftlichen Gemeinschaft die wandlungsfähige Produktion betrachtet (WESTKÄMPER 1999, REINHART 2000, SPATH ET AL. 2002, WIENDAHL 2002, WIENDAHL ET AL. 2007A). Das turbulente Umfeld erfordert es, den optimalen Betriebspunkt einer Produktion zu verändern, um eine optimale Wirtschaftlichkeit erreichen zu können. Wandlungsfähige Produktionssysteme ermöglichen dies durch eine schnelle und aufwandsarme Anpassung von Fertigung, Montage und Logistik.

#### **3.2.2 Flexibilität**

Die Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit beziehen sich im produktionstechnischen Kontext auf die Veränderungsfähigkeit von Systemen. Da sowohl in der wissenschaftlichen Gemeinschaft als auch in der betrieblichen Praxis häufig keine scharfe Abgrenzung der Bezeichnungen stattfindet, werden im Folgenden die jeweiligen Spezifika diskutiert.

In der wissenschaftlichen Literatur existiert eine Vielzahl von Arbeiten, die sich mit der Definition von Flexibilität beschäftigen (BEACH ET AL. 2000, CHRYSOLOURIS 1996, HALLER 1999, S. 16 ff., NARAIN ET AL. 2000, SCHNEEWEIß & KÜHN 1990, SETHI & SETHI 1990, SHEWCHUK & MOODIE 1998, DE TONI & TONCHIA 1998). Eine wesentliche Charakteristik von Flexibilität ist, dass die Veränderungsfähigkeit der Systeme sich in einem sogenannten Flexibilitätskorridor bewegt, dessen Grenzen bereits bei der initialen Systemerstellung festgelegt werden. MÖLLER definiert die Flexibilität als „die Fähigkeit eines Systems, sich schnell und mit sehr geringem finanziellen Aufwand an Veränderungen des Umfeldes anzupassen. Ein flexibles System besitzt zum Zeitpunkt [...] seiner Inbetriebnahme definierte und bekannte obere und untere Grenzen [...], welche die erreichbaren Zustände einschränken. Die Anpassung erfolgt ohne eine Veränderung der Systemelemente.“ (2008, S. 15).

MORALES fasst eine Reihe von Aspekten aus der Literatur zusammen, die darlegen, warum Flexibilität in der Produktion nicht für eine notwendige Beherr-



schung des turbulenten Umfelds ausreichend ist (2003, S. 25). So ermöglicht die statische Flexibilität nur eine Veränderung in vorgehaltenen Dimensionen, die bereits bei der Planung festgelegt werden müssen. Das turbulente Umfeld orientiert sich nicht an der betrieblichen Flexibilität, sondern erfordert eine Überschreitung der festgelegten Korridore.

### 3.2.3 Wandlungsfähigkeit

Wie in 3.2.2 beschrieben ist die Veränderungsfähigkeit im Kontext der Flexibilität durch sogenannte Fähigkeitskorridore beschränkt, die bereits bei der initialen Systemerstellung definiert werden. Im Gegensatz dazu wird Wandlungsfähigkeit als Charakteristik verstanden, die es erlaubt, Veränderungen außerhalb vordefinierter Korridore reaktiv oder proaktiv durchführen zu können (REINHART ET AL. 2002, ZÄH ET AL. 2004). Wandlungsfähige Systeme sind weitgehend lösungsneutral und besitzen bei der Erstellung keine expliziten Grenzen (CISEK ET AL. 2002). Die aufgrund turbulenter Umfeldfaktoren notwendigen Anpassungsmöglichkeiten sind vorgedacht, aber in der Regel mit zusätzlichen Investitionskosten und Zeitaufwand verbunden. Diese entstehen jedoch erst bei der Durchführung der Veränderungsmaßnahme. Abbildung 12 zeigt die für wandlungsfähige Systeme typische Verschiebung des Flexibilitätskorridors.

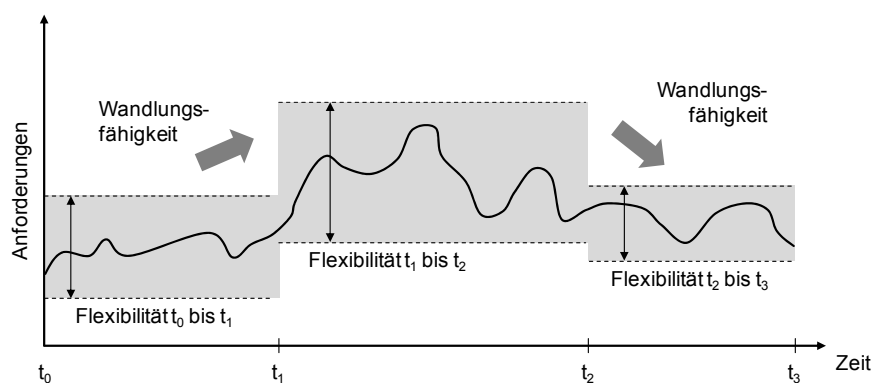


Abbildung 12: Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (ZÄH ET AL. 2005A)

Die wissenschaftliche Diskussion der Wandlungsfähigkeit fokussiert häufig strategische Aspekte und berücksichtigt explizit organisatorische Ausprägungen. Auf technischer Ebene wird Wandlungsfähigkeit häufig unter dem Stichwort Rekonfigurierbarkeit adressiert. Dabei kann durch Rekonfiguration innerhalb vordefinierter Korridore agiert werden, was der Definition von Flexibilität ent-

spricht. Werden im Rahmen von Rekonfigurationsmaßnahmen diese Korridore verlassen, so wird Wandlungsfähigkeit realisiert. Eine allgemeingültige scharfe Trennung ist hier nicht möglich und eine Einordnung muss anwendungsfallspezifisch durchgeführt werden.

DASHCHENKO bietet eine breite Übersicht über Klassifizierung, Design und Betrieb rekonfigurierbarer Produktionssysteme (2006). Hervorzuheben ist dabei die Definition nach KOREN, wonach ein rekonfigurierbares System so zu entwerfen ist, dass eine schnelle Modifikation der Struktur aus Hard- und Softwaremodulen möglich ist, um eine Anpassung der Produktionskapazität oder Funktionalität innerhalb einer Produktfamilie zu realisieren (2006). Um dies zu erreichen, werden autonome und standardisierte Funktionseinheiten gefordert, die schnell und aufwandsarm rekonfiguriert werden können (HEISEL & MARTIN 2004). Rekonfigurierbare Produktionssysteme sind angedacht, die Lücke zwischen hochspezialisierten, und damit für definierte Randbedingungen effizienten, Systemen einerseits und hochflexiblen, und damit in der Regel teuren, Maschinen andererseits zu schließen (KOREN ET AL. 1999, MEHRABI ET AL. 2002, ELMARAGHY 2006).

#### 3.2.4 Wandlungsbefähiger

In der wissenschaftlichen Gemeinschaft wird eine Reihe von Attributen diskutiert, durch die wandlungsfähige Produktionssysteme gekennzeichnet sind. MORALES bezeichnet diese „[...]individuelle[n] und ungerichtete[n], abrufbare[n] Eigenschaft[n] eines Wandlungsobjektes“ als Wandlungsbefähiger (2003, S. 54). Abbildung 13 zeigt die primären Wandlungsbefähiger Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität, wie sie in der wissenschaftlichen Diskussion präsent sind (HEGER 2007, KOREN 2005, WIENDAHL ET AL. 2007B, MORALES 2003, S. 55).

Universalität beschreibt dabei die Fähigkeit eines technischen Produktionssystems, sich veränderten Anforderungen hinsichtlich Technologie bzw. Produktgestaltung anpassen zu können. In Bezug auf den Mitarbeiter ist Universalität als die Einsetzbarkeit für verschiedene Produktionsaufgaben, erreicht durch Aus- und Weiterbildung, zu verstehen. Mobilität beschreibt die örtlich uneingeschränkte Beweglichkeit von Objekten. Betriebsmittel können ohne oder nur mit geringem Aufwand verlagert und so eine kontinuierliche oder schrittweise Adaption der Fabrikstruktur bzw. des Layouts realisiert werden.

Unter Skalierbarkeit wird die technische, räumliche und personelle Erweiter- und Reduzierbarkeit eines Produktionssystems verstanden. So erlauben spezielle Arbeitszeitmodelle beispielsweise eine Anpassung der Kapazitäten an externe Anforderungen eines turbulenten Umfelds.

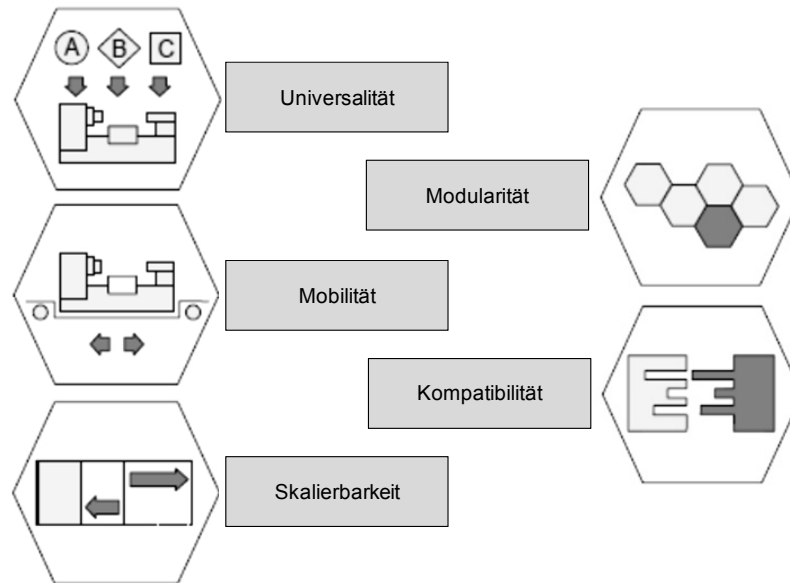


Abbildung 13: Übersicht Wandlungsbefähiger (in Anlehnung an NYHUIS ET AL. 2007)

Die Fähigkeit eines Produktionssystems, singulär funktionsfähige, standardisierte Einheiten bzw. Elemente aufwandsarm austauschen zu können, wird als Modularität bezeichnet. Modularität fokussiert den Aspekt der Systemarchitektur und wird in der betrieblichen Praxis häufig durch eigenständige Prozessmodule realisiert. Die Fähigkeit unterschiedlicher Prozessmodule und Betriebsmittel im Verbund eine Produktionsfunktion zu realisieren, wird Kompatibilität genannt und ist ein weiterer Wandlungsbefähiger. Kompatibilität ermöglicht es einzelnen Modulen und Betriebsmitteln sich zu vernetzen und Information, Medien oder Energie über Schnittstellen auszutauschen. Aufgrund der besonderen Bedeutung des Wandlungsbefähigers Kompatibilität erfolgt eine gesonderte Diskussion in Abschnitt 3.3 dieser Arbeit.

NYHUIS nennt zusätzlich sekundäre Wandlungsbefähiger (2008, S. 27). Diese sind den primären Wandlungsbefähigern untergeordnet und fügen keine neuen Aspekte hinzu, sondern ergänzen oder detaillieren vielmehr die Bestehenden. Als

Beispiel für sekundäre Wandlungsbefähiger wird Neutralität genannt, die im Sinne der gegenseitigen Nichtbeeinflussung eine Grundlage für Modularität und Kompatibilität von Modulen darstellt.

Für die Wandlungsfähiger ist es möglich, unterschiedliche Stufen der Erfüllung zu definieren (HEGER 2007). Je deutlicher eine wandlungsbefähigende Eigenschaft ausgeprägt ist, desto wandlungsfähiger ist das betrachtete Produktionssystem oder Betriebsmittel.

### 3.3 Kompatibilität

Der folgende Abschnitt der Arbeit fokussiert den Wandlungsbefähiger Kompatibilität, der im Kontext hochautomatisierter Produktionssysteme von besonderer Bedeutung ist (REINHART ET AL. 2009). Betrachtet werden dabei neben den Schnittstellen automatisierter Betriebsmittel, das ISO/OSI-Modell<sup>1</sup>, welches grundlegend die Kommunikation technischer Systeme beschreibt. Davon ausgehend werden Systemarchitekturen für rekonfigurierbare Produktionssysteme aus Wissenschaft und industrieller Anwendung vorgestellt.

#### 3.3.1 Schnittstellen automatisierter Betriebsmittel

Automatisierte Betriebsmittel sind weitgehend modular und eigenständig als mechatronische Module mit Subsystemen und Komponenten aufgebaut (WECK & BRECHER 2006, S. 137). Unter mechatronischen Systemen sind dabei solche zu verstehen, deren Aufbau durch das Zusammenwirken von mechanischem Aufbau, Elektrik und Software gekennzeichnet ist. Funktional ist meist eine Gliederung in Sensorik, Rechensystem mit zugehörigen Steuerungsprogrammen und Aktorik üblich (ISERMANN 2008, S. 4, ZACHER 2000, S. 269). In hochautomatisierten Produktionssystemen wird die Gesamtfunktionalität in der Regel durch die Verkettung unterschiedlicher automatisierter Betriebsmittel realisiert. Diese sind eigenständig für spezifische Aufgaben verantwortlich und besitzen dezentrale Steuer- und Regelungskompetenz (ZACHER 2000, S. 305). Die Verbindung der einzelnen Module, aber auch von Subsystemen und Komponenten, erfolgt dabei über Schnittstellen, die wie die Module selbst die drei Fachdisziplinen Mechanik,

---

<sup>1</sup> ISO/OSI-Modell: International Standardization Organization Open Systems Interconnection Reference Model

---

Elektrik und Informationstechnik fokussieren. Im Folgenden werden die Charakteristika der entsprechenden Schnittstellen diskutiert.

### **Mechanische Schnittstellen**

Die mechanischen Schnittstellen in der Anlagentechnik sind weitgehend lösbare Verbindungen, die über Form- oder Kraftschluss realisiert werden. Die Schraubtechnik ist dabei von besonderer Bedeutung, um lösbare Verbindungen mit ausreichender Festigkeit zwischen Modulen, Baugruppen und Komponenten zu ermöglichen (KOETHER & RAU 2008, S. 189, WEBER 2006, S. 11).

Neben der festigkeitsgebenden Verbindungstechnik werden in der Anlagentechnik auch die pneumatischen Schnittstellen, die der Versorgung von Komponenten mit dem Medium Druckluft dienen, der Mechanik zugeordnet. Diese sind entsprechend der komponentenspezifischen Anforderungen auszulegen und unterscheiden sich hinsichtlich maximaler Durchflussmenge, Druckniveau und Leitungsquerschnitt (GEVATTER 2000, S. 223 ff.). Zusätzlich werden der erforderliche Reinheitsgrad der Druckluft, der Anteil von Schmierstoffen und die zulässige Luftfeuchte definiert. Die physikalische Verbindung erfolgt über genormte Kupplungselemente (CROSER & EBEL 2006, S. 24, STROHRMANN 1998, S. 200).

### **Elektrische Schnittstellen**

Funktion der elektrischen Schnittstellen automatisierter Betriebsmittel ist die Versorgung mit elektrischer Energie. Im Bereich der Anlagentechnik haben sich in den letzten Jahren dabei drei relevante Spannungsprofile durchgesetzt, die als Standard in der industriellen Anwendung akzeptiert sind (STROHRMANN 1998, S. 116, WELLENREUTHER & ZASTROW 2005, S. 743 ff.).

Energieintensive Verbraucher wie Antriebstechnik oder auch Systeme der Prozesstechnik, z. B. Schweißtechnik oder Heizsysteme, werden in der Regel mit 400 V Drehstrom, also drei 230 V Wechselstromprofile mit einer Phasenverschiebung von 120° versorgt. Die Leitungsführung erfolgt über drei Leistungsphasen und einen Neutralleiter. Die Auslegung der Leitungsquerschnitte und die Absicherung über Schutzschalter werden aufgabenspezifisch entsprechend der Energieaufnahme des Verbrauchers durchgeführt.

Die steuerungstechnischen Einrichtungen, aber auch Verbraucher mit geringer Leistungsaufnahme, werden in der Anlagentechnik mit Gleichstrom der Spannung 24 V versorgt. Die Anbindung erfolgt hier zweiphasig.

Neben der Versorgung mit Gleich- und Drehstrom gewinnt durch den Einzug der Office-PC-Technik die Anbindung von Komponenten über einphasigen 230 V Wechselstrom an Bedeutung. Verwendet werden dabei dreiadrige Leitungen mit Außenleiter, Neutralleiter und Schutzleiter.

Spezifiziert werden die elektrischen Schnittstellen in den Dokumenten der Elektrokonstruktion bzw. in gerätespezifischen Anschlussplänen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Stromlaufpläne, die beschreiben, wie die elektrische Energieversorgung in einem Maschinen- oder Anlagenbereich realisiert wird, und die Geräteverdrahtungspläne, die definieren, wie Geräteklemmen und Stecker zu belegen sind (ZICKERT 2009, S. 106 ff., ZACHER 2000, S. 477 ff.).

Die physikalische Ausführung der Anschlüsse erfolgt entweder in Steckertechnik oder über Klemmleisten in Schaltschränken bzw. im Gerätegehäuse. Vorteil der Steckertechnik ist die einfache Lösbarkeit, die eine aufwandsarme Installation und Rekonfiguration aber auch den schnellen Komponentenaustausch im Störfall unterstützt. Dem stehen Kostenvorteile der Klemmleistentechnik gegenüber (GEVATTER 2000, S. 19 ff.).

#### **Informationstechnische Schnittstellen**

Im Unterschied zu mechanischen und elektrischen Verbindungen sind die informationstechnischen Schnittstellen durch eine große Diversifizierung und Varianz bestimmt. Diese sind durch die schnelle Weiterentwicklung der Kommunikations- und Rechnertechnik, bedingt durch kurze Innovationszyklen, begründet.

Die in der Vergangenheit übliche direkte Verdrahtung, also die direkte physische Verbindung durch eine Signalleitung, von Aktoren und Sensoren mit Steuereinrichtungen ist heute nur noch bei einfachster Technik und kleinen, kompakten Systemen üblich (FAVRE-BULLE 2004, S. 101).

Abgelöst wurde die direkte Verdrahtung in den letzten Jahren durch sogenannte Feldbussysteme. Diese dienen der Realisierung des in einem Automatisierungssystem notwendigen Datenaustausches und sind in der Regel als lokale Netze bzw. serielle Bussysteme umgesetzt. Sie ermöglichen neben der vertikalen vor allem die horizontale Kommunikation in der Automatisierungshierarchie und unterscheiden sich in ihrer konkreten Ausprägung hinsichtlich Topologie, Datenübertragungsrate, Zugriffsverfahren, Fehlertoleranz und zugrundeliegender Technik (REINHARDT 2006, S. 248). Basis der Bussysteme ist das generische Modell für die Kommunikation technischer Systeme der ISO (International

---

Standardization Organization), welches in 3.3.2 detailliert erläutert wird. Kapitel 3.3.3 bietet einen Überblick über Grundlagen zu Bussystemen in der Automatisierungstechnik.

Komplexe Systeme mit integrierter Datenverarbeitung besitzen heute in der Regel eine eigene Feldbusanbindung und können mit deren Hilfe mit zentralen Steuerrechnern kommunizieren. Einfache Systeme, die örtlich verteilt im Feld verortet sind, werden in der Regel über dezentrale E/A-Module (dezentrale Peripherie) an Steuersysteme angebunden. Diese Module besitzen eine Busanbindung und können über modulare Klemmentchnik direktverdrahtete Systeme anschließen (WELLENREUTHER & ZASTROW 2005, S. 616).

### **3.3.2 ISO/OSI-Modell für die Kommunikation technischer Systeme**

Eine bis heute anerkannte Referenzarchitektur für die Kommunikation technischer Systeme stellt das 1977 von der ISO (International Standardization Organization) verabschiedete OSI-Modell (Open System Interconnection) dar (ISO 1994). Ziel des Modells ist es, Regeln für die Funktionsweise der Kommunikation heterogener Systeme festzulegen. Dabei bestehen bei der Implementierung Freiheiten bezüglich der Komponentenstruktur, der verwendeten Programmiersprache oder der Gestaltung der Benutzerschnittstellen. Kommunikationssysteme, die der OSI-Spezifikation entsprechen, werden als offene Systeme bezeichnet.

Kern des Modells ist die Strukturierung der Kommunikation in unterschiedliche Schichten, deren Abstraktionsgrad von unten nach oben zunimmt. Grundprinzip der Architektur ist es dabei, dass untergeordnete Schichten Dienste für übergeordnete erbringen. Als Protokolle werden die Regeln bezeichnet, die in einer Schicht spezifiziert sind. Die unteren Schichten realisieren dabei den Nachrichtentransport und die physikalische Generierung der Signale. In den übergeordneten Schichten sind die Kommunikationsanwendungen und anwendungsnahen Funktionen angesiedelt (HÄCKELMANN ET AL. 2000, S. 28). ZIMMERMANN beschreibt dreizehn allgemeine Kriterien, nach denen die Festlegung der Schichten erfolgt (1980). Die wesentlichen Grundprinzipien sind dabei:

- So wenig Schichten wie möglich, um die Komplexität der Beschreibung zu minimieren.
- Grenzen zwischen Schichten sind so zu wählen, dass die Anzahl der verbindenden Dienste klein und deren Beschreibung wenig umfangreich ist.

- Bildung unterschiedlicher Schichten für grundlegend unterschiedliche Funktionen in Bezug auf Prozess oder eingesetzte Technik.
- Zusammenfassung ähnlicher Funktionen in gemeinsamen Schichten.
- Die Änderung von Funktionen innerhalb einer Schicht sollte keine oder nur minimale Effekte für andere Schichten bewirken.

Abbildung 14 zeigt eine schematische Darstellung des OSI-Modells.

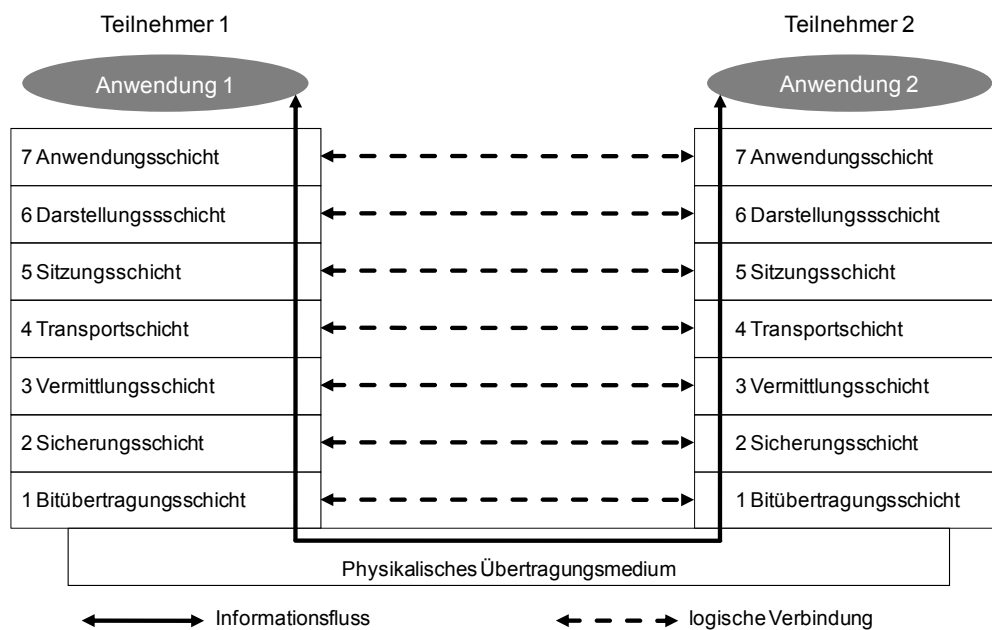


Abbildung 14: ISO/OSI-Modell (in Anlehnung an SCHROM 2003, S. 27)

Im Folgenden werden die Funktionen der einzelnen Schichten des Referenzmodells allgemein erläutert. Grundlegende Aufgabe der Bitübertragungsschicht ist die Erzeugung und die Übertragung der Binärzeichen (Bits). Dies umfasst den Aufbau und die Überwachung der Verbindung sowie die Erzeugung der entsprechenden Signale mit definierten physikalischen Eigenschaften wie Spannung und Laufzeit. Die Normung von Steckverbindungen und Spezifikation von Leitungen sind weitere Aufgaben von Schicht 1. Das physikalische Medium selbst ist nicht Teil des OSI-Modells, sondern liegt unterhalb der Bitübertragungsschicht. Die zweite Schicht wird als Datensicherungsschicht bezeichnet und garantiert den sicheren Transport von logischen Gruppierungen einzelner Bits, die als Nachrichten bezeichnet werden. Ein typischer Mechanismus für die Erkennung von fehlerhaften Übertragungen ist die Generierung und Überwachung von nachrichtenspezifischen Prüfsummen. Die Vermittlungsschicht (Schicht 3) stellt inner-



---

halb eines Kommunikationsnetzes durch die Auswahl und Überwachung eines Weges (Routing) End-zu-End-Verbindungen zwischen Kommunikationspartnern her. Des Weiteren ist die Überlastungssteuerung, also die Überwachung der maximal verfügbaren Übertragungs-, Speicher- und Verarbeitungskapazität, Hauptaufgabe dieser Ebene. Die Transportschicht (Schicht 4) stellt für höhere Schichten logische bzw. virtuelle Verbindungen bereit und unterstützt so die Kommunikation zwischen Anwendungsprozessen. Kern der Transportschicht sind Maßnahmen, die die Dienstgüte, also die Qualität der Datenübertragung, steigern. Die Synchronisation des Dialogs kommunizierender Einheiten und die prioritäts- und gütebezogene Verwaltung von Kommunikationsbeziehungen zwischen Anwender-Einheiten, sogenannten Sitzungen, sind Funktionen der Schicht 5, die auch als Sitzungsschicht bezeichnet wird. Im Fokus der Darstellungsschicht (Schicht 6) stehen Syntax und Semantik der übertragenen Nachrichten. Aufgabe ist unter anderem die Konvertierung von endgerätspezifischen Darstellungsformen in eine einheitliche Standarddarstellung des Netzwerks. Die Anwendungsschicht (Schicht 7) konkretisiert die zu realisierende Kommunikationsaufgabe. Typische in Protokollen standardisierte Funktionen sind die Übertragung von Dateien, die Kommunikation von Aufträgen oder der Versand von elektronischen Nachrichten (HÄCKELMANN ET AL. 2000, S. 32 ff., WEIDENFELLER 2002, S. 667 ff.).

Ziel des OSI-Modells ist die Schaffung einer Referenzarchitektur für die Kommunikation technischer Systeme. Der Fokus liegt dabei auf Rechnersystemen und ist durch die Informatik und Nachrichtentechnik geprägt. Die physikalische Verbindung von Systemen wird nur am Rande thematisiert. Des Weiteren werden funktionale Aspekte nur in Bezug auf die Datenübertragung angesprochen. So ist die Übertragung von Dateien eine Funktion, die in Schicht 7 definiert wird. Übergeordnete Angaben zum funktionalen Signalaustausch zwischen Einzelsystemen sind kein Inhalt dieser Ebene.

### **3.3.3 Bussysteme in der Automatisierungstechnik**

Bussysteme stellen in der Automatisierungstechnik die standardisierten Schnittstellen für den Signalaustausch verteilter mechatronischer Komponenten dar. Bussysteme decken dabei die Kommunikationsbedarfe innerhalb einzelner Ebenen der Automatisierungspyramide (Ein-Ebenen-Strukturen), aber auch zwischen mehreren Ebenen von Automatisierungssystemen (Mehr-Ebenen-Strukturen) ab und dienen so der Koordination dezentral verteilter intelligenter Aktor-, Sensor-

und Steuereinheiten (GEVATTER 2000, S. 201). Im Folgenden werden die wesentlichen Kriterien für die Klassifizierung unterschiedlicher Bussysteme und die gängigen Ausprägungen in der industriellen Praxis erläutert.

Unter Netzwerktopologie wird die Art und Logik der Verbindungen in einem Bussystem verstanden. Hierbei gilt es, die allgemeinen Anforderungen an Bussysteme, geringe Vernetzungskosten, hohe Flexibilität, hohe Übertragungssicherheit und kurze Reaktionszeiten auf Kommunikationsanfragen sowie anwendungsspezifische Bedürfnisse, zu erfüllen. Abbildung 15 zeigt typische Netzwerktopologien. Ist ein zentrales Gerät über einzelne Punkt-zu-Punkt-Verbindungen mit allen dezentralen Geräten verbunden, spricht man von einer Sternstruktur. Problematisch ist hierbei, dass bei einem Ausfall des zentralen Geräts keine weitere Kommunikation mehr möglich ist. Wird die Sternstruktur durch zusätzliche Verbindungen zwischen allen weiteren Geräten erweitert, so entstehen Netzstrukturen, welche durch einen überproportional hohen Verkabelungsaufwand und schlechte Erweiterbarkeit gekennzeichnet sind. Eine Sequenz ringförmig angeordneter Zweipunktverbindungen bildet eine Ringstruktur, die jeweils nur die direkte Kommunikation benachbarter Geräte ermöglicht. Der Ausfall einer Station hat hier den Ausfall der Gesamtkommunikation zur Folge, was ein erhebliches Zuverlässigkeitsproblem darstellen kann. Die meisten Netzwerke der Automatisierungstechnik sind als linienförmige Bustopologie ausgeführt. Die Teilnehmer sind über einen gemeinsamen Übertragungsweg und kurze Stichleitungen miteinander verbunden. Von besonderer Bedeutung ist bei dieser Struktur die Festlegung der Zugriffsrechte auf die gemeinsame Kommunikationsleitung (FAVRE-BULLE 2004, S. 102 ff., ZACHER 2000, S. 349).

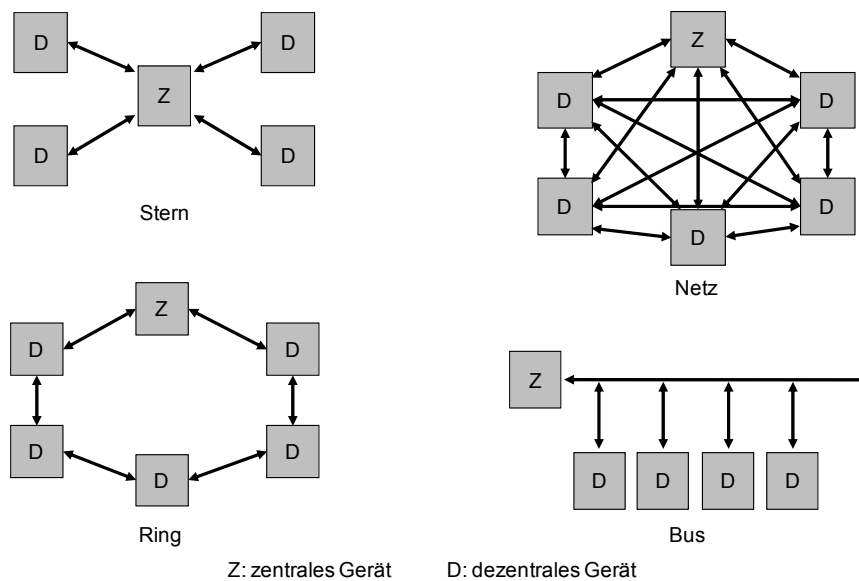


Abbildung 15: Typische Netzwerktopologien (FAVRE-BULLE 2004, S. 103)

Neben der Netzwerktopologie sind die Buszugriffsverfahren ein wichtiges Kriterium bei der Klassifizierung von Bussystemen. Diese Zugriffsverfahren definieren die Regeln und Mechanismen, die festlegen, wann welcher Kommunikationsteilnehmer auf die gemeinsam genutzten Ressourcen des Netzwerks zugreifen darf. Grundsätzlich werden dabei Verfahren, bei denen der Zeitpunkt des Zugriffs festgelegt ist, sogenannte deterministische Verfahren, und Mechanismen bei denen ein zufälliger Buszugriff erfolgt, sogenannte nicht-deterministische Verfahren, unterschieden. Ein typisches deterministisches Verfahren ist das Master-Slave-Verfahren. Dabei ist ein Busteilnehmer als Master für die Koordination der untergeordneten Kommunikationspartner (Slaves) zuständig. Ein weiteres weit verbreitetes deterministisches Buszugriffsverfahren ist das Token-Passing-Verfahren bei dem keine explizite Masterstation definiert ist sondern die Zuteilung der Nutzungsrechte an den virtuellen Rundlauf eines Tokens unter den Stationen gebunden ist. Das „Time Division Multiple Access“ (TDMA) Verfahren bietet jedem Kommunikationsteilnehmer innerhalb einer definierten Zeitspanne einen oder mehrerer Zeitabschnitte definierter Länge für Kommunikationsfunktionen. Die konkrete Ausprägung erfolgt meist über sogenannte Schieberegister, die taktweise von Station zu Station übertragen werden. Ein ebenfalls nicht-deterministisches Verfahren ist das „Carrier Sense Multiple Access“ (CSMA) Verfahren, bei dem ein sendewilliger Teilnehmer prüft, ob das Kommunikationsmedium verfügbar ist und gegebenenfalls die Kommunikation anstößt. Bei gleichzeitigen Sendeversuchen unterschiedlicher Partner erfolgt entweder ein

Abbruch der Sendevorgänge (Collision Detection - CD) oder eine Priorisierung der Sendevorgänge (Collision Avoidance - CA) (FAVRE-BULLE 2004, S. 107 ff., GEVATTER 2000, S. 202 ff.).

In der Feldbuskommunikation ist neben den Endgeräten eine Reihe von Systemen mit jeweils typischem Funktionsprofil zur Realisierung unterschiedlicher Kommunikationsaufgaben im Einsatz.

Bidirektionale Leistungsverstärker dienen in der Bustechnik dazu, die maximale Leitungslänge zu steigern und die elektrische Belastung durch die angebundenen Teilnehmer zu begrenzen. Sie werden als Repeater bezeichnet und verändern die übermittelten Daten nicht. Switches werden für die sternförmige Verbindung von Teilnehmern eingesetzt und filtern den Datenverkehr anhand der Zieladressen und verteilen adressierte Daten an die entsprechenden angeschlossenen Geräte. Switche besitzen die Fähigkeit zur Datenpufferung und können so Netzsegmente mit unterschiedlicher Datenrate ohne eine Rückstufung des gesamten Netzes auf die niedrigere Datenrate koppeln. Die Verbindung von einzelnen Subnetzen in einem Netzwerk wird durch Router realisiert. Diese übernehmen die Wegesteuerung und verteilen Datenpakete auf Basis der Zieladressen zwischen den einzelnen Teilbereichen des Netzwerks. Gateways dienen der Verbindung von Netzwerken mit unterschiedlichen Übertragungsprotokollen. Gateways erlauben die Kopplung von Bussystemen, die sich hinsichtlich aller Schichten des ISO/OSI-Modells unterscheiden und integrieren die Funktionalität aller Schichten der zu verbindenden Protokolle. Daten können so zwischen unterschiedlichen Bussystemen übertragen werden (WELLENREUTHER & ZASTROW 2005, S. 686 ff., REISSENWEBER 2009, S. 51f, BECKER 2006, S. 126 ff.).

In der betrieblichen Praxis existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Bussysteme, die häufig für spezielle Anwendungen entwickelt wurden und den spezifischen Anforderungen genügen. Im Folgenden werden die Bussysteme vorgestellt, die in der Anlagentechnik der automatisierten Produktion von Bedeutung sind.

#### **Profibus**

Die herstellerübergreifende Kompatibilität durch den Einsatz offener, firmenneutraler Standards stand bei der Entwicklung des Process Field Bus (Profibus) im Vordergrund. Profibus weist ein hybrides Buszugriffverfahren, eine Kombination aus dem Token-Passing und dem Master-Slave-Prinzip, auf und ist aufgrund schneller Reaktionszeiten besonders für die Vernetzung von Geräten auf der Feldebene über eine Busstruktur mit maximal 124 Teilnehmern geeignet.

---

Unterschieden werden die Varianten Profibus FMS, Profibus DP und Profibus PA. Die Varianten FMS und DP sind hierbei klassische Feldbussysteme, wobei DP für schnelle Datenübertragung optimiert ist. PA ist als eigensicheres Bussystem für explosionsgefährdete Bereiche in der Prozesstechnik beheimatet (ZACHER 2000, S. 364, FAVRE-BULLE 2004, S. 122).

### **Interbus S**

Für die feldnahe Vernetzung von Sensor- und Aktorsystemen mit kurzen, deterministischen Zykluszeiten wurde Interbus S von der Firma Phoenix Contact entwickelt und nach DIN 19258 standardisiert. Interbus S weist eine Ringtopologie auf und nutzt ein Master-Slave-Zugriffsverfahren. Als Übertragungsmedium werden Zweidrahtleitungen oder Lichtwellenleiter eingesetzt. Dies ermöglicht erreichbare Gesamtleitungslängen von bis zu 13 km bei einer maximalen Teilnehmerzahl von 512 (ZACHER 2000, S. 368).

### **Actuator-Sensor-Interface (ASI)**

Das AS-Interface ist ein Bussystem für die Kommunikation zwischen Automatisierungsgeräten und einfachen, binären Sensoren wie kapazitiven Näherungsschaltern, Lichtschranken, Schützen oder Relais. Das AS-Interface bietet ein einfaches und kostengünstiges Bussystem, welches für die echtzeitfähige Übertragung der geringen Informationsmengen ausreichend ist. Ein deutlich reduzierter Verkabelungsaufwand wird durch die Versorgung mit Hilfsenergie über das Bussystem erreicht. Das Zugriffsverfahren entspricht dem deterministischen Master-Slave-Prinzip bei einer maximalen Teilnehmerzahl von 31. Die Topologie weist eine Linien- bzw. Busstruktur auf (GEVATTER 2000, S. 216 ff.).

### **SafetyBus P**

Die Kommunikation von Signalen mit Relevanz für die Sicherheit einer Maschine oder Anlage erfolgt zunehmend über sogenannte Sicherheitsbusse, die die mehrkanalige redundante Verdrahtung ablösen. Eines der am weitesten verbreiteten Systeme ist der SafetyBus P, der von der Firma Pilz entwickelt wurde und heute als offener Industriestandard vorliegt.

SafetyBus P ermöglicht die Kommunikation von bis zu 64 Teilnehmern, in der Regel sicherheitsrelevante Sensoren und Aktuatoren und Sicherheitsschaltgeräte bzw. -steuerungen. Das Kommunikationsverhalten ist ereignisgesteuert und ermöglicht Reaktionszeiten von ca. 25 ms (GEVATTER 2006, S. 581).

#### **Industrial Ethernet**

Ein wesentlicher Trend in der industriellen Automatisierung ist die Nutzung von Technologien aus dem Umfeld der PC-Technik. Ein prägnantes Beispiel hierfür ist das Bussystem Industrial Ethernet, das eine Anpassung des Ethernet-Standards für den industriellen Einsatz darstellt. Ethernet wurde ursprünglich als Netzwerk für offene Local Area Network Kommunikation (LAN) entwickelt und im Rahmen der IEEE802.3 normativ spezifiziert. Industrial Ethernet unterscheidet sich von Installationen im Büro-EDV-Umfeld durch eine Reihe von Vorschriften hinsichtlich Verkabelung und Gerätegestaltung. Diese zielen auf eine erhöhte Verfügbarkeit und gesteigerte Robustheit gegenüber rauen Produktionsumgebungen ab (WELLENREUTHER & ZASTROW 2005, S. 641).

Der Buszugriff erfolgt hier stochastisch nach dem CSMA/CD-Verfahren in Netzwerken mit Linien- oder Sternstruktur. Die maximale Teilnehmerzahl liegt bei 1024. Aufgrund des nicht-deterministischen Übertragungsverhaltens ist Industrial Ethernet nicht für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit der Datenübertragung geeignet. In Netzwerken mit wenigen Teilnehmern und geringem Kommunikationsaufkommen lässt sich aufgrund der möglichen hohen Übertragungsraten dennoch ein quasi-echtzeitfähiges Kommunikationsverhalten realisieren. Industrial Ethernet wird in der praktischen Anwendung vornehmlich für die Kommunikation zwischen dezentrale gesteuerten Anlagenbereichen und für die Anbindung der Feldebene an übergeordnete Leitungssysteme eingesetzt (ZACHER 2000, S. 363).

#### **Profinet**

Die Profibus Nutzerorganisation (PNO) als Hersteller- und Anwenderübergreifende Vereinigung hat in den zurückliegenden Jahren die Anwendung der Ethernet-Technologie auf Feldebene vorangetrieben und das Feldbussystem Profinet (Process Field Ethernet) entwickelt.

Profinet spezifiziert eine Übertragungstechnik entsprechend dem Fast-Ethernet-Standard mit einer Übertragungsrate von 100MBit/s, wobei die physische Verkabelung mittels Twisted-Pair-Kupferleitungen oder zweiphasiger Lichtwellenleiter erfolgt. Eine Sterntopologie wird über einen zentralen Switch, eine Linienstruktur über in die Endgeräte integrierte 2-Port-Switche realisiert. Der Aufbau von Profinet-Netzwerken ist zudem über kabellose Funktechnik via Wireless Local Area Network Technik (WLAN) möglich.

---

Die deterministische und damit echtzeitfähige Kommunikation wird bei Profinet durch die Nutzung unterschiedlicher Kommunikationskanäle realisiert. Der TCP/UDP-IP-Kanal dient der nicht-deterministischen Übertragung zeitunkritischer Daten. Die Übertragung von Daten mit „weichen“ Echtzeitanforderungen erfolgt über den Soft-Real-Time-Kanal (SRT), der eine zyklische Übertragung mit Aktualisierungszeiten von ca. 10 ms ermöglicht. Für die Realisierung anspruchsvoller Echtzeitanforderungen bietet Profinet einen sogenannten Isochrone-Real-Time-Kanal (IRT), der Aktualisierungszeiten von 1 ms mit einer Taktgenauigkeit von 1  $\mu$ s bietet. Für die Nutzung der IRT-Kommunikation ist der Einsatz von sogenannter IRT-fähiger Hardware, die mit entsprechenden Mikroprozessoren ausgestattet ist, Voraussetzung. Die Erweiterung der nicht-deterministischen Datenübertragung mit zusätzlichen Kanälen für eine deterministische Kommunikation ist der gemeinsame Ansatz bei allen echtzeitfähigen Ethernet-basierten Feldbussystemen wie Powerlink oder EtherCAT (WELLENREUTHER & ZASTROW 2005, S. 664 ff., BECKER 2006, S. 174).

Ein weiterer Entwicklungsschritt ist die Umsetzung einer „sicheren“ Kommunikation über Profinet-Verbindungen für die Übertragung personen- und maschinensicherheitsrelevanter Signale in zertifizierten Sicherheitsklassen (PIGAN & METTER 2008, S. 21). Von besonderer Bedeutung ist dies vor dem Hintergrund der Realisierung der Funktionalität von sicheren Steuerungen in Standard-SPS-Systemen. Die sicherheitsgerichtete Kommunikation und Logik kann so in eine gemeinsame Steuerungsarchitektur integriert werden, was mit erheblichen Reduzierungen der Kosten für Hardware und Installation sowie Instandhaltung verbunden ist (BERGER 2010, S. 34 ff.).

### **3.3.4 Systemarchitekturen für rekonfigurierbare Produktionssysteme**

Die Forschungsgemeinschaft der Produktions- und Automatisierungstechnik beschäftigt sich schon seit vielen Jahren mit der Entwicklung von Systemarchitekturen, die eine aufwandsarme Rekonfiguration von automatisierten Produktionssystemen möglich machen. Aufgrund der besonderen Bedeutung der Datenübertragung und Steuerungstechnik fokussieren die im Folgenden vorgestellten Ansätze häufig Aspekte der Informationsübertragung und -verarbeitung.

#### **OSACA**

Das durch die Europäische Union geförderte und von einem Konsortium aus Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen in drei aufeinanderfolgenden

Projekten bearbeitete Vorhaben „Open System Architecture for Controls within Automation Systems - OSACA“ verfolgte das Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit und Flexibilität von Automatisierungsherstellern und -anwendern durch die Entwicklung einer herstellerunabhängigen, offenen Steuerungsarchitektur zu steigern. Im Rahmen des Projektes wurden Anforderungen an Steuerungssysteme analysiert und eine Architektur, als Systemplattform bezeichnet, spezifiziert und implementiert. Grundprinzip dieser Architektur ist die Verteilung der Steuerungsfunktionalität auf einzelne Module, sogenannte Architekturobjekte, die in ein standardisiertes Framework, welches Funktionen für Kommunikation und Datenaustausch bereitstellt, eingebettet sind (OSACA 1995, PRITSCHOW ET AL. 2001, ZURAWSKI 2005).

Der OSACA-Ansatz fokussiert in erster Linie numerische Steuerungen (NC) für Bewegungsachsen in Werkzeugmaschinen. Die modulare Architektur spezifiziert ausschließlich die Gestaltung der Software, die auf einer gemeinsamen Hardware ausgeführt wird. Aspekte der Systemrekonfiguration werden in den Forschungsarbeiten nicht explizit berücksichtigt.

#### **HÜMNOS**

Aufbauend auf den Ergebnissen des Vorhabens OSACA wurden in einem durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten und durch den Verband deutscher Werkzeugmaschinenhersteller (VDW) koordinierten Projekt „Herstellerübergreifende Module offener Steuerungen – HÜMNOS“ die Entwicklung einer herstellerübergreifend nutzbaren, offenen Systemarchitektur weiter vorangetrieben. Ziel war es hierbei, die Möglichkeit zu schaffen, Anwendungssoftware auf verschiedene Werkzeugmaschinen hardwareunabhängig portieren zu können. Des Weiteren wurde die konsistente Gestaltung von Benutzeroberflächen fokussiert. Das Konsortium setzte sich aus einer Reihe von Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnikherstellern, Endanwendern und Forschungsinstituten zusammen (VDW 1998, MILBERG & MAUDERER 1996, S. 16 ff., BULLINGER ET AL. 2002, S. 544).

Ähnlich wie die Systemplattform des Projektes OSACA sind die Ergebnisse des Forschungsvorhabens auf das Anwendungsgebiet der Werkzeugmaschinen eingegrenzt. Ebenso beschränken sich die Arbeiten auf die Gestaltung einer Softwarearchitektur und integrieren keine Aspekte der physikalischen und funktionalen Anbindung.



---

## **PLUG + PRODUCE**

Im Rahmen des durch das BMBF geförderten Projektes PLUG + PRODUCE wurden an der Technischen Universität Chemnitz unter anderem Gestaltungsstrategien für eine aufwandsarm rekonfigurierbare Fabrik der Zukunft entworfen. Hierbei wird die Fabrikstruktur unterschiedlich granular strukturiert. Neben Fabrikkomponenten werden Fabrikmodule und Fabrikssysteme als Gestaltungsobjektclassen definiert. Die Komponenten stellen dabei die kleinste, nicht weiter teilbare Einheit dar, die bei Rekonfigurationsprozessen zu neuen Produktionsstrukturen zusammengesetzt werden (HILDEBRAND ET AL. 2005, S. 33). Die Problematik nicht kompatibler Systeme wird dabei auf organisatorischer und technischer Ebene betrachtet. Die Arbeiten bieten eine umfassende theoretische Systematik zur Klassifizierung von Schnittstellen zwischen Systemen (HILDEBRAND ET AL. 2005, S. 81) und generische Handlungsempfehlungen für eine übergreifende Standardisierung von Schnittstellen (HILDEBRAND ET AL. 2005, S. 94). Wesentliche Schwerpunkte des Forschungsvorhabens sind zusätzlich die Arbeitsorganisation (HILDEBRAND ET AL. 2005, S. 129 ff.) und planerische Aspekte. Diese werden in Kapitel 3.4 dieser Arbeit noch detaillierter erläutert.

Der in den Forschungsarbeiten des Verbundprojektes PLUG + PRODUCE erarbeitete Ansatz bietet eine theoretische Systematik für die Klassifizierung von Schnittstellen und allgemeine Hinweise für die Standardisierung. Konkrete Lösungsansätze für den praktischen Umgang mit nicht-kompatiblen Systemen werden nicht dargestellt.

### **Sonderforschungsbereich 467 Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen**

Ziel des Sonderforschungsbereichs 467, der durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurde, war die Erforschung von Methoden, Modellen und Verfahren zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. Das entwickelte „Stuttgarter Unternehmensmodell“ beschreibt ein Produktionssystem, welches eine verlustfreie und schnelle Anpassung der Fabrik an veränderte Rahmenbedingungen durch die Grundprinzipien Kooperation, Selbstorganisation, Selbstoptimierung, Selbstkontrolle, Selbstkonfiguration und technische Intelligenz ermöglicht (WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 47). Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurde unter anderem auch die Gestaltung von einheitlichen Modulschnittstellen gefordert, um eine aufwandsarme Rekonfiguration von Produktionsstrukturen zu ermöglichen (WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 120 ff.).

Im Bereich der technischen Systemgestaltung bietet der Sonderforschungsbereich nur Gestaltungshinweise für die Schnittstellenstandardisierung. Die Schwerpunkte der Forschungsarbeiten lagen im Bereich Unternehmensorganisation, Modellierung und digitale Werkzeuge.

#### **METEOR**

Der Kerninhalt des durch das BMBF geförderten Verbundprojektes „Mehrtechnologie orientierte Werkzeugmaschine“ (METEOR) war die Entwicklung einer modularen und rekonfigurierbaren Werkzeugmaschine. Das erarbeitete System ermöglichte zum einen die Anpassung des Produktionssystems an Schwankungen des Produktionsvolumens, zum anderen erlaubte es eine Adaption an neu zu fertigende Produkte. Eine Nutzung von Maschinenmodulen über den Lebenszyklus der zu produzierenden Produkte konnte so realisiert werden (ABELE & STANIK 2007, S. 25 ff.). Erreicht wurde dies durch einzelne Funktionsmodule, die aufwandsarm zu aufgabengerechten Maschinenkonfigurationen zusammengesetzt werden können. Bei der Gestaltung der Modulschnittstellen wurden dabei in erster Linie mechanische Aspekte betrachtet. Von besonderer Bedeutung war dabei das für Werkzeugmaschinen in höchstem Maße qualitätsrelevante statische und dynamische Verhalten (ABELE & STANIK 2007, S. 65 ff.). Zusätzlich wurden Aspekte der Simulation und Bewertung von alternativen Systemkonfigurationen bearbeitet. Diese werden in Abschnitt 3.4 thematisiert.

Elektro- und informationstechnische Schnittstellen wurden im Rahmen des Projektes nur peripher untersucht. Zudem fand eine starke Fokussierung auf Werkzeugmaschinen statt. Es erfolgte keine Betrachtung von weiteren Automatisierungssystemen.

#### **3.3.5 Vereinfachte Konfiguration durch adaptive Schnittstellen**

Die Entwicklung adaptiver und intelligenter Schnittstellen ist ein weiterer Ansatz, der darauf abzielt, den Aufwand für die Rekonfiguration von automatisierten Produktionsanlagen zu reduzieren. Erreicht werden soll dies durch eine Automatisierung bzw. Unterstützung des Anwenders bei der Konfiguration, also der Auswahl der Geräte und Einrichtung der Basiskommunikation. Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich dabei auf eine Weiterentwicklung und Adaption bestehender „Plug & Play“-Verfahren, wie beispielsweise Universal Serial Bus (USB) aus der Office-IT. Aus diesem Grund wird der Ansatz auch als „Plug & Produce“ bezeichnet (REINHART ET AL. 2011).

Ziel des Ansatzes ist es, die Phase der Systemintegration, die einen Hauptaspekt der Inbetriebnahme darstellt, zu vereinfachen. Die Integration neuer Geräte in ein Automatisierungssystem erfolgt dabei in den fünf Hauptschritten, physische Verbindung, Kommunikationsverbindung, Konfigurations-, Applikations- und Aufgabenphase. Das Herstellen der Kommunikationsverbindung umfasst die Festlegung der Netzwerk- und Kommunikationsparameter. Im Rahmen der Konfiguration werden Datentypen und Telegramme spezifiziert. In der Applikationsphase werden die Basisfunktionen, die ein Gerät bereitstellt, programmiert. Die Aufgabenphase beinhaltet die Erstellung des aufgabenspezifischen Programmcodes. Diese heute weitgehend manuellen Tätigkeiten sollen durch den Plug & Produce-Ansatz teilautomatisiert werden. Kern der Aktivitäten ist dabei ein Zustandsmodell, welches die aktuelle Konfiguration des Automatisierungssystems abbildet (siehe Abbildung 16).

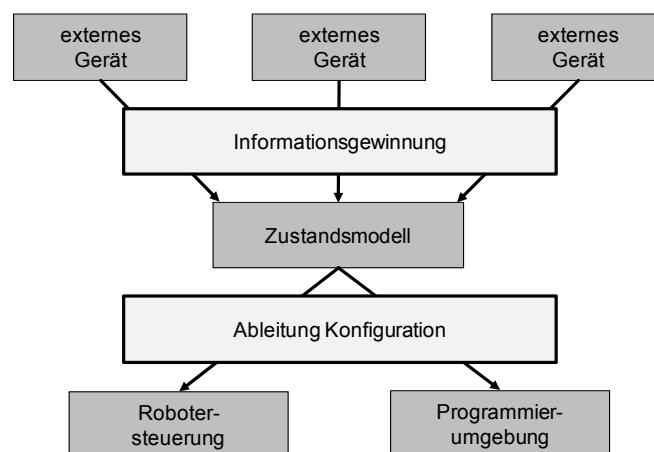


Abbildung 16: Zustandsmodellbasierte Konfiguration (REINHART & KRUG 2012)

Besonderheit des Ansatzes ist es, dass externe Geräte auf integriertem Speicher die jeweiligen spezifischen Konfigurationsdaten lokal bereitstellen. Durch Mechanismen für die Informationsgewinnung werden diese dezentralen Daten in ein übergreifendes Zustandsmodell überführt und dort zentral bereitgestellt. Ausgehend von diesem zentralen Modell werden anschließend die Kommunikationseinstellungen, Konfigurationen und Funktionen für die Robotersteuerung und die Programmierumgebung, die für die aufgabenspezifische Programmierung eingesetzt wird, abgeleitet. Diese Vorgänge laufen weitgehend ohne Benutzerinteraktion automatisiert ab (REINHART & KRUG 2012). Da es hierfür notwendig ist, dass die eingesetzten Basistechnologien gewisse Kommunikationsmechanismen bereitstellen, ist der forschungsseitig getriebene Ansatz heute weitgehend auf

Ethernet-basierte Bustechnologien beschränkt. Zudem ist eine weitere Grundvoraussetzung für die erfolgreiche industrielle Umsetzung, die Bereitstellung von Konfigurationsdaten in einem herstellerübergreifend standardisierten Format auf in Geräten integrierten Speicher, heute noch nicht gegeben.

## **3.4 Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen**

Aktuelle Arbeiten aus Wissenschaft und industrieller Anwendung, die die Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen automatisierter Produktionsanlagen thematisieren, werden in diesem Kapitel der Arbeit vorgestellt. Neben Vorgehensmodellen und Methoden werden dabei Ansätze für die Bewertung präsentiert.

### **3.4.1 Methoden und Vorgehensmodelle**

Im Folgenden werden unterschiedliche Methoden und Vorgehensmodelle für die Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen erläutert.

#### **PLUG + PRODUCE**

Im Rahmen des bereits in Abschnitt 3.3.4 vorgestellten Projektes „PLUG + PRODUCE“ wurde neben einer Systematik zur Gestaltung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen auch eine Planungsmethodik erarbeitet.

Diese konzentriert sich im Wesentlichen auf die dynamische Adaption der Fabrikstruktur aufgrund neuer externer Anforderungen. Grundsätzlich wird das Produktionssystem dabei als adaptive Regelstrecke verstanden, auf die die Planung als Regler über Stellgrößen einwirkt und Kontrollgrößen als Feedback der Zustandsinformation erhält. Typische Stellgrößen sind dabei Vorgaben zur Bearbeitungsreihenfolge, Arbeitszeiten oder Anzahl der verfügbaren Ressourcen. Als Kontrollgrößen werden beispielsweise die Auslastung der Ressourcen, die Durchlaufzeit oder die Kosten betrachtet. Führungsgrößen für die Planung sind von außen vorgegebene Zielgrößen wie etwa das Produktionsprogramm, zu erreichende Durchlaufzeiten oder Produktionskosten. Das Umfeld wirkt, ähnlich wie Störgrößen in der klassischen Regelungstechnik, direkt auf das Produktionssystem, welches in diesem Ansatz als sozio-technisches System verstanden wird und durch Produktionstechnik (Ressourcen), Prozesse und Personal charakterisiert ist (HILDEBRAND ET AL. 2005, S. 169 ff.). Abbildung 17 zeigt eine Übersicht über das entwickelte Planungsvorgehen.

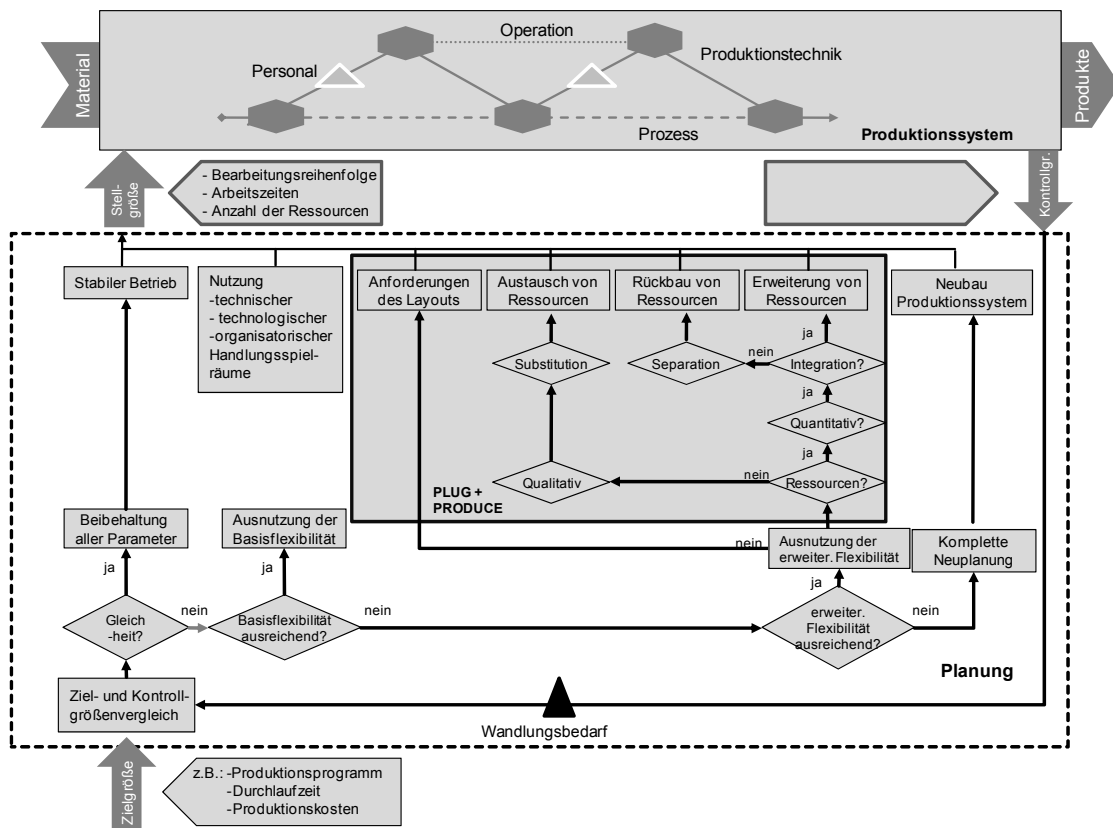


Abbildung 17: Dynamisches Strukturadaptionskonzept (HILDEBRAND ET AL. 2005, S. 172)

Grundprinzip der Methode ist der kontinuierliche Abgleich zwischen Ziel- und Kontrollgrößen und, falls eine Abweichung vorliegt, der Anstoß von Adaptionsmaßnahmen. Hierbei wird unterschieden, ob eine Erreichung der Zielgrößen durch Ausnutzung des systemimmanenten Flexibilitätskorridors möglich ist oder eine Anpassung der Systemstruktur notwendig ist. Ist dies der Fall, findet eine Festlegung notwendiger Maßnahmen über eine Reihe von kaskadierten Entscheidungsfragen statt. Die Maßnahmen reichen dabei von einer Änderung des Layouts über den Austausch, den Rückbau oder die Erweiterung von Ressourcen bis hin zur vollständigen Neuplanung (HILDEBRAND ET AL. 2005, S. 170 ff.). Der Prozess der Layoutplanung wurde zudem hinsichtlich beteiligter Organisationseinheiten und verfügbarer Werkzeuge zur Prozessunterstützung untersucht.

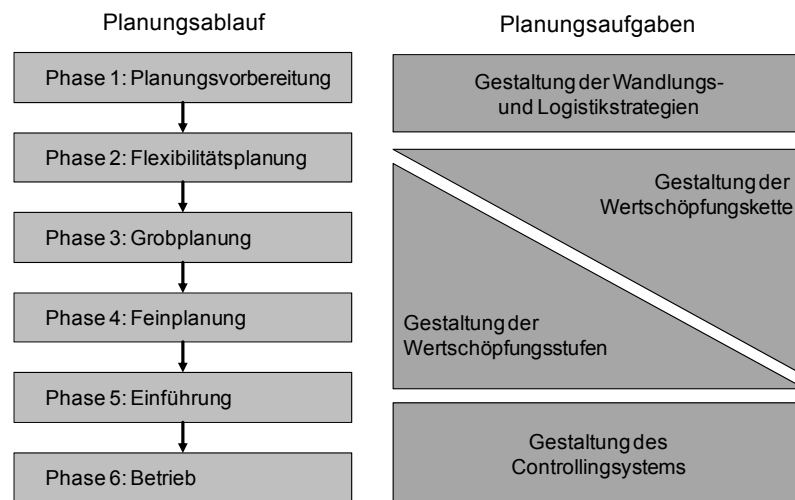
Insgesamt fokussiert der in PLUG + PRODUCE erarbeitete Planungsansatz ausschließlich strategische Aspekte und ist stark auf die Layoutplanung eingeschränkt. Die Planung der Betriebsmittel auf technischer Ebene wird nicht betrachtet.

#### **Dürschmidt 2001**

Eine Methodik für die Planung und den Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion wurde 2001 von Dürschmidt vorgestellt. Der Fokus der am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München durchgeführten Forschungsarbeiten lag im Bereich der Logistiksysteme, ist aber in großen Teilen auch auf Produktionssysteme übertragbar.

Zum einen wurde ein Konzept für die Modellierung wandlungsfähiger Logistiksysteme entwickelt, welches eine transparente Darstellung der Funktionen und Elemente ermöglicht und so die Ableitung von Anpassungsstrategien erleichtert. Grundprinzip der Modellierung ist dabei die hierarchische Abbildung des Systems durch sogenannte Logistikbausteine, die sowohl die strategische als auch die strukturelle und operative Ebene inkludieren (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 73). Diese Logistikbausteine sind jeweils durch interne Kennzahlen, wie beispielsweise Durchlaufzeit, und externe Kennzahlen auf Kunden- und Lieferantenseite, wie etwa Liefertreue oder Bedarfskontinuität, charakterisiert (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 75). Ausgehend von der Systemmodellierung werden dann entsprechend der veränderten Rahmenbedingungen Anpassungsstrategien abgeleitet. Diese werden in fünf Klassen eingeteilt, die sich hinsichtlich der „Art der Anpassung der Wertschöpfungsstufen“ und der „Veränderung der Struktur der Wertschöpfungskette“ unterscheiden (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 81 ff.).

Ergänzend zum Modellierungskonzept wurde zum anderen eine Methodik für Planung und Betrieb entwickelt. Diese fokussiert neben der initialen Systemplanung auch die betriebsbegleitende Veränderungsplanung und ist in sechs Phasen, denen jeweils spezifische Ziele entsprechend der hierarchischen Strukturierung der Planungsobjekte zugeordnet sind, gegliedert. Abbildung 18 zeigt die sechs Planungsphasen und die zugehörigen Planungsaufgaben in einer Übersicht.



*Abbildung 18: Einordnung der Planungsaufgaben in den Planungsablauf  
(DÜRRSCHMIDT 2001, S. 93)*

Wesentliche Neuerung des Planungsansatzes ist die Phase der Flexibilitätsplanung, die die klassischen Planungsphasen (vgl. 2.4.1) ergänzt. Kerninhalte dieser Phase sind die Definition relevanter Planungsszenarien, die Ableitung von Art und Tiefe der notwendigen Anpassungen, die Festlegung des Entscheidungsraums und die Erarbeitung von Wandlungsstrategien (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 108 ff.). Neben der Flexibilitätsplanung ist das betriebsbegleitende Controlling von besonderer Bedeutung. Dieses trägt während der Betriebsphase dazu bei, dass sich das System im wirtschaftlich optimalen Betriebspunkt befindet. Dies wird durch ein Monitoringsystem realisiert, welches neben externen Umfeldeterminanten auch interne Kenngrößen integriert und so eventuelle Wandlungsbedarfe identifiziert und anstößt (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 129 ff.). Abbildung 19 zeigt das entwickelte Controllingkonzept und das Vorgehen für eine Anpassungsplanung. Hierbei findet auf Basis eines Soll-Ist-Vergleichs der relevanten Kenngrößen eine Wirkungs- und Ursachenanalyse statt, die als Grundlage für die Entscheidungsfindung dient. Ist eine Systemadaption notwendig, so wird auf unterschiedliche Reaktionsmuster zurückgegriffen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des Grads der notwendigen Systemänderung und integrieren die entsprechend notwendigen Planungsphasen. Die Systemadaption kann dabei von einer Anpassung unter Ausnutzung der vorhandenen Flexibilitätskorridore bis zu einer Änderung des Zielsystems der frühen Planungsphase mit anschließender Neuplanung reichen (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 131).

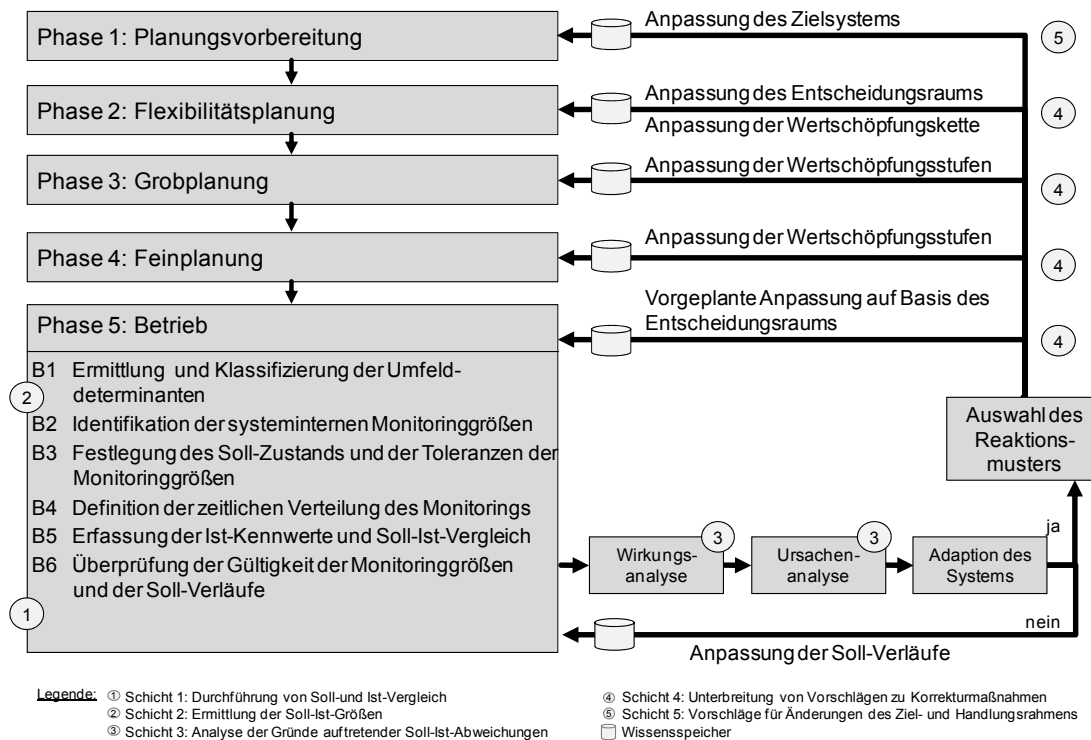


Abbildung 19: Konzeption des Controllingsystems (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 130)

Die erarbeitete Planungsmethodik bietet einen Ansatz für Anpassungsplanung von Logistiksystemen, ist prinzipiell aber auch für Produktionssysteme nutzbar. Die Granularität der Betrachtung liegt dabei auf Ebene von Wertschöpfungsstufen. Konkrete Aspekte der Betriebsmittelplanung, -gestaltung und -beschaffung werden nicht thematisiert.

#### Kohler 2008

KOHLER entwickelte eine Methodik zur effizienten Unterstützung der kontinuierlichen Planung und Optimierung produktionstechnischer Systeme. Die Umplanung von Produktionssystemen wird dabei als kontinuierliche, betriebsbegleitende Aufgabe im Rahmen des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) verstanden (2008, S. 37). Kerninhalt der Arbeit ist die Entwicklung eines Softwarewerkzeugs, welches die kontinuierliche Planung unterstützt und in die Funktionsmodule Layout, Materialfluss, Flächen und Struktur, Dimensionierung, Analyse und Bewertung eingeteilt ist. Die Betriebsmittelplanung wird dabei als Teil der Materialflussplanung verstanden und berücksichtigt neben den geometrischen Abmessungen in erster Linie organisatorische und technische Kennzahlen,



wie technische Verfügbarkeit, Arbeitszeitmodelle oder Anforderungen an die Bedienerqualifikation.

Grundprinzip der Lösung ist die Vernetzung unterschiedlicher Planungswerkzeuge über eine gemeinsame Grunddatenbasis und Schnittstellen zwischen den Einzelwerkzeugen. Des Weiteren ist die Absicherung von Planungsentscheidungen und vor allem der Systemdimensionierung durch Simulation ein Hauptaspekt der Arbeiten. Für die Bewertung von Planungsalternativen wurde ein umfassendes monetäres Bewertungsmodell entwickelt, welches die Herstellkosten auf Basis der Prozesskosten ermittelt. Die Ressourcennutzungsdaten, gegliedert in betriebsmittel-, transportmittel-, lager- und personalspezifische Daten, werden in unterschiedlichen Teilmodulen genutzt, um Kostensätze für Betriebsmittelkosten, Fertigungsgemeinkosten, Transportmittelkosten, Lagerkosten und Personalkosten zu kalkulieren. Diese Kostensätze werden dann mit den Produktdaten verrechnet und so die Prozesskosten, die Grundlage für die Herstellkosten, ermittelt (KÖHLER 2008, S. 90 ff.). Abbildung 20 zeigt den grundlegenden Aufbau des Bewertungsmoduls.

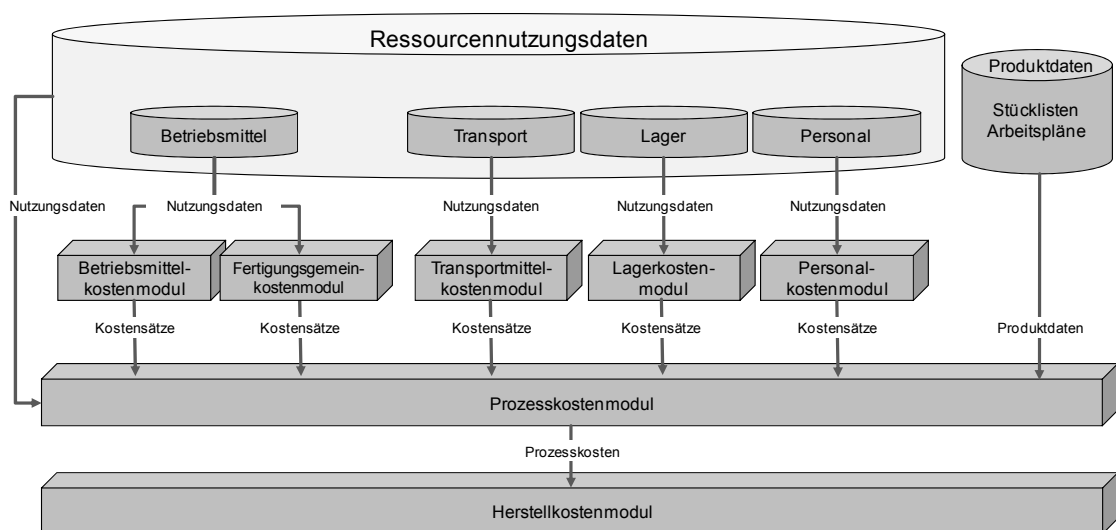


Abbildung 20: Grundlegender Aufbau des Bewertungsmoduls (KÖHLER 2008, S. 96)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Arbeiten in erster Linie ein Konzept für ein umfassendes und praxistaugliches Softwarewerkzeug für die Fabrikplanung bieten. Neben der Integration der Simulation zur Absicherung von Planungsalternativen spielt die Bewertung über die produktspezifischen Herstellkos-

ten eine wichtige Rolle. Die Planung wird grundsätzlich als eine betriebsbegleitende, kontinuierliche Aktivität verstanden. Eine vertiefte Berücksichtigung der Veränderungsplanung findet aber nicht statt. Zudem wird die Betriebsmittelplanung nur in geringem Umfang betrachtet.

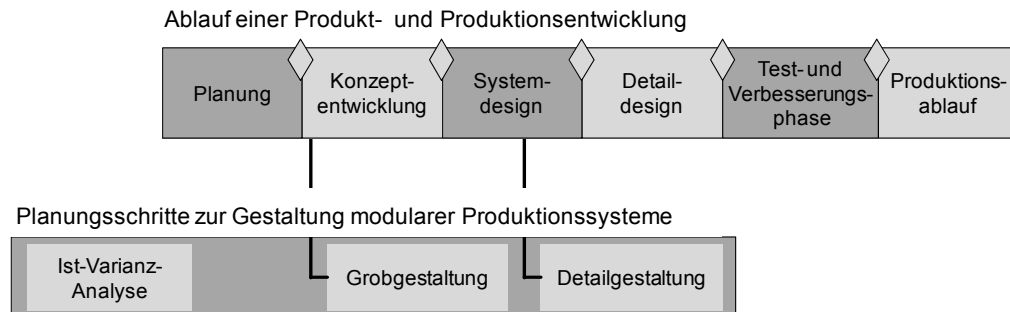
#### **Neuhausen 2001**

Neuhausen entwickelte am Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen eine Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Der vorgestellte Ansatz umfasst dabei zum einen ein Modellierungskonzept für die Beschreibung von Produktionssystemen, zum anderen wurde eine Planungs- bzw. Gestaltungsmethodik erarbeitet.

Das Modell eines Produktionssystems, welches dem Paradigma der Objektorientierung folgt, aggregiert hierbei die Partialmodelle Produktprogramm, Produkt, Produktion und Bewertung (NEUHAUSEN 2001, S. 58 ff.). Die jeweiligen Teilmodelle sind dabei über Objekte mit zugehörigen Attributen definiert. So setzt sich das Produktprogramm aus mehreren Produkttypen zusammen, die jeweils über Identifikationsnummer, zeitbezogene Stückzahlbedarfe und Produktmerkmale mit zugehörigen Merkmalsausprägungen verfügen. Das Produktmodell ist in Baugruppen und Komponenten gegliedert. Betrachtet werden hierbei die Volatilität und Varianz der Merkmalsausprägungen. Die Darstellung der Wirkung der Produktvarianz auf die Produktion ist Aufgabe des Produktionsmodells, welches die Betrachtungsebenen Produktionslinie, -modul bzw. -station und -prozess beinhaltet. Um die Wechselwirkungen zwischen Produkten und Produktion zu beschreiben, werden Matrixdarstellungen verwendet. Abhängigkeiten zwischen einzelnen Elementen des Produktionssystems werden ebenfalls über eine Matrix modelliert. Die Wechselwirkungen werden hierbei in den Kategorien niedrig, mittel und hoch beschrieben, eine detaillierte Modellierung der technischen Abhängigkeiten findet nicht statt. Das Bewertungsmodell umfasst neben einem Produktionskostenmodell ein Kostenmodell für dienstleistende Bereiche.

Grundprinzip der Planungsmethodik ist es, den Einfluss von Änderungen auf bestimmte Elemente der Produktion zu begrenzen und ein „entkoppeltes Design“ zu schaffen (NEUHAUSEN 2001, S. 75). Dies wird durch Gestaltungsrichtlinien, die jeweils für bestimmte Betrachtungsebenen, nämlich Produktionslinie, -modul und -prozess gelten, realisiert (NEUHAUSEN 2001, S. 84 ff.). Das Vorgehen ist in

die Phasen Ist-Varianz-Analyse, Grobgestaltung und Detailgestaltung, die die klassischen Planungsschritte ergänzen, eingeteilt (siehe Abbildung 21).



*Abbildung 21: Vorgehensweise zur Gestaltung modularer Produktionssysteme (NEUHAUSEN 2001, S. 101)*

Wesentlicher Kern der Planungsmethodik ist die Ist-Varianz-Analyse, deren Ziel es ist, die variantenbezogene Information in einem Unternehmen zu erfassen und die relevanten Einfluss- und Kenngrößen zu bestimmen (NEUHAUSEN 2001, S. 102 ff.). Hierzu werden vor Beginn des Entwicklungsprojektes die relevanten Informationen erfasst und die entsprechenden Modelle unternehmensspezifisch detailliert. Dementsprechend betrachtet die Analyse sequentiell die Aspekte Produktprogramm, Produktstruktur, Produktionssystem, Produktionskosten und Kosten dienstleistender Bereiche und integriert die Ergebnisse in die entsprechenden Modelle. Ausgehend von den gewonnenen Informationen werden in der Phase der Grob- und Detailgestaltung Lösungskonzepte entwickelt und bewertet. Wesentlicher Vorteil dabei ist die Berücksichtigung der in den Modellen hinterlegten Wechselwirkungen zwischen Produkt, Produktionsprogramm, Produktion und Kosten. Eine konkrete Unterstützung für die Betriebsmittelplanung bietet der Ansatz nicht.

### **Stuttgarter Unternehmensmodell (DFG Sonderforschungsbereich 467)**

In dem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereich (SFB) 467, der von 1997 bis 2005 an der Universität Stuttgart bearbeitet wurde, wurden Methoden, Modelle und Verfahren erarbeitet, die die Wandlungsfähigkeit von Unternehmen erhöhen. Die Ergebnisse des SFB wurden im sogenannten Stuttgarter Unternehmensmodell (SUM) zusammengeführt, welches ein Produktionssystem beschreibt, das in der Lage ist, sich schnell und verlustfrei an den Wandel des Umfelds anzupassen. Dies wird durch eine Strukturie-

rung des Systems in Leistungseinheiten und eine Orientierung an den Grundprinzipien Kooperation, Selbstorganisation, Selbstoptimierung, Selbstkontrolle, Selbstkonfiguration und technische Intelligenz realisiert (WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 47).

Das Stuttgarter Unternehmensmodell zielt dabei auf methodische Verbesserungen in den Bereichen

- Strategien, Führungs- und Controllingkonzepte in wandlungsfähigen Unternehmen,
- wandlungsfähige Planung von Strukturen und von
- adaptiven Montage- und Bearbeitungssystemen,
- wandlungsfähige Prozesse der Planung und Steuerung,
- Beitrag der Humanressourcen zur Wandlungsfähigkeit,
- wandlungsfähige Informationssystemmechanismen und
- Wissensmanagement in wandlungsfähigen Unternehmen ab (WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 49).

Entsprechend der Zielsetzung sind die Arbeiten in die Felder Führung und Controlling, Planung und Steuerung, Technik und Strukturen, Humanressourcen, Informationstechnologien und Wissen gegliedert. Die Aufgabe der Fabrik- bzw. Betriebsmittelplanung wird dabei aufgrund der notwendigen Rekonfigurationsprozesse als häufig wiederkehrende bzw. permanente Aktivität identifiziert und ist integraler Bestandteil des Modells (WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 59).

Der Lösungsansatz, um den Planungsaufwand zu reduzieren, ist die Entwicklung einer Planungsumgebung, welche die unterschiedlichen Planungswerkzeuge integriert. Werkzeuge sind hierbei klassische Computer Aided Design (CAD)-Tools, ein Planungstisch zur Visualisierung von Layouts, ein sogenannter Logistik-Prüfstand zur simulativen Absicherung und Optimierung des Materialflusses sowie eine Verwaltung der relevanten Produkt- und Ressourcendaten (WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 125 ff.). Die Ist-Analyse der existierenden Strukturen und Betriebsmittel erfolgt über eine Erfassung mittels 3D-Laserscanner (WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 124 ff.). Das mehrstufige Vorgehen ist in Abbildung 22 dargestellt und erlaubt eine schnelle und aufwandsarme Digitalisierung bestehender Produktionsszenarien als Grundlage für weitere Planungsschritte, die in erster Linie den Materialfluss und die Layoutgestaltung fokussieren.

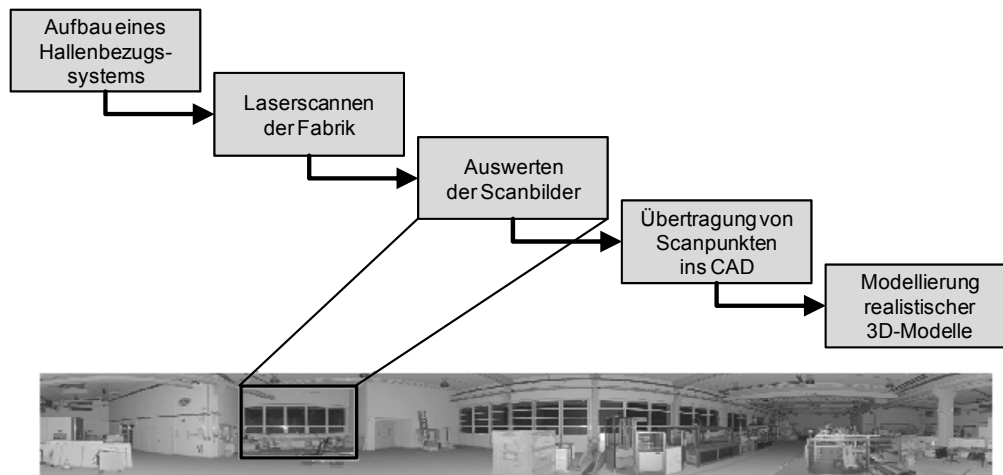


Abbildung 22: Vorgehensweise des 3D-Laserscannens (in Anlehnung an WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 125)

Die technische Betriebsmittelplanung wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs nur peripher betrachtet. Die Notwendigkeit modularer und vor allem kompatibler Betriebsmittel (WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 72) und die besonderen technische Herausforderungen bei der Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen (WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 116) werden explizit formuliert. Als Lösungsansatz werden Konzepte skizziert, die eine Gestaltung von rekonfigurierbaren Betriebsmitteln am Beispiel einer modularen Bearbeitungsmaschine zeigen (WESTKÄMPER & ZAHN 2008, S. 118 ff.).

### Rekonfiguration mit Funktionsmodulen (Heisel und Michaelis)

Heisel und Michaelis stellen ein Konzept für die Rekonfiguration von Betriebsmitteln auf der Basis von Funktionsmodulen vor (BULLINGER ET AL. 2002, S. 532 ff.). Betrachtet werden hierbei vornehmlich Bearbeitungsmaschinen, die, ähnlich wie bei den Arbeiten im Projekt METEOR, aus mechatronischen Baugruppen mit standardisierten Schnittstellen aufgebaut sind. Diese Schnittstellen umfassen dabei neben mechanischen Aspekten auch elektro- und informationstechnische Aspekte. Untergliedert werden die Schnittstellen in drei Betrachtungsebenen (BULLINGER ET AL. 2002, S. 541). Auf Systemebene werden die Grenzen des Systems zur Umgebung definiert und die logistische Anbindung festgelegt. Die Modulschnittstellen verbinden unterschiedliche Funktionsmodule innerhalb einer rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschine. Schnittstellen von Elementen innerhalb von Funktionsmodulen werden auf Submodulebene berücksichtigt.

Für eine spezifische Produktionsaufgabe wird eine konkrete Maschinenkonfiguration mit Hilfe eines sogenannten Baukastens aus wiederverwendbaren Funktionsmodulen zusammengesetzt. Abbildung 23 zeigt die Vorgehensweise für die Planung einer Rekonfiguration auf Basis eines Baukastensystems in einer Übersichtsdarstellung.

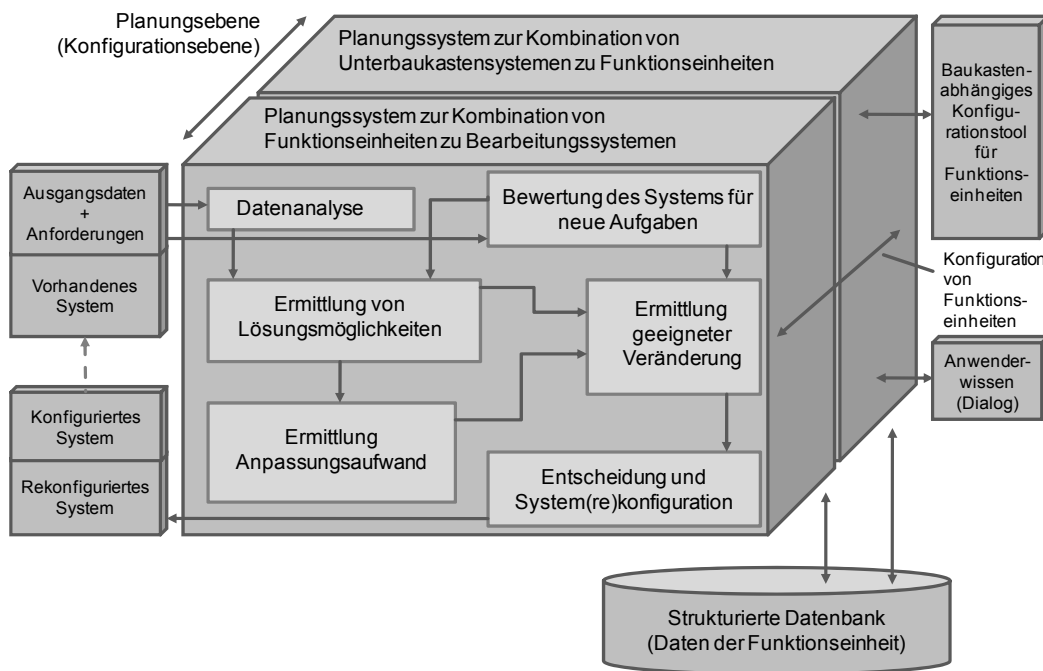


Abbildung 23: Planung von Rekonfigurationen (BULLINGER ET AL. 2002, S. 545)

Ausgangspunkt einer Rekonfiguration sind veränderte Ausgangsdaten und Anforderungen an ein Bearbeitungssystem. Informationen zum bereits existierenden System werden genutzt, um zu prüfen, ob eine Rekonfiguration notwendig ist. Ist dies der Fall, so werden unterschiedliche Systemkonfigurationen als mögliche Lösungen erarbeitet und die jeweils notwendigen Veränderungen abgeleitet. Unter Berücksichtigung des notwendigen Anpassungsaufwands wird dann eine Entscheidung für die optimale Konfigurationsalternative getroffen. Das Planungsvorgehen berücksichtigt neben der Ebene der Funktionsmodule zusätzlich Submodule als unterlagerte Schicht, die die interne Rekonfiguration von Funktionseinheiten ermöglicht. Das Anwenderwissen wird in die Planungsmethode über einen Benutzerdialog integriert. Informationen zu den Funktionsmodulen sind in einer strukturierten Datenbank hinterlegt. Die Anwendung der Planungsmethode wird durch ein Softwarewerkzeug (Konfigurationstool) unterstützt (BULLINGER ET AL. 2002, S. 544 ff.). Grundlage und zugleich Einschränkung der entworfenen

---

Vorgehensweise ist die Voraussetzung des Vorliegens von Funktionsmodulen mit standardisierten Schnittstellen. Entsprechende Systeme sind derzeit am Markt und in produzierenden Unternehmen kaum vorhanden.

### **3.4.2 Bewertung von Rekonfigurationsmaßnahmen**

Dieser Abschnitt der Arbeit zeigt relevante Ansätze für die Bewertung von Rekonfigurationsmaßnahmen.

#### **Klassische Verfahren der Investitionskostenrechnung**

Die Bewertung von Rekonfigurationsmaßnahmen erfolgt im Planungsprozess, auch in Ermangelung spezifischer Verfahren, in der Regel mittels der üblichen Vorgehensweisen der Investitionskostenrechnung. Im Rahmen dieser Arbeit soll nur ein kurzer Überblick über die üblichen Methoden gegeben werden. Für weitergehende Informationen sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (STIEGLER 1999, S. 142 ff.; BECKER 2009, S. 37 ff.; SCHÄFER 2005, S. 29 ff.).

Ein typisches Verfahren ist die Kostenvergleichsrechnung, bei der eine Auswahlentscheidung auf Basis der gegenüberstellenden Bewertung der Kosten erfolgt (SCHÄFER 2005, S. 31). Hierbei werden die Faktoren in die Kostenarten Kapitalkosten, die sich aus kalkulatorischen Abschreibungen und kalkulatorischen Zinsen zusammensetzen, und Betriebskosten, die beschäftigungsfixe und –variable Kostenarten, z. B. Löhne, Gehälter und Lohnnebenkosten, Material- und Energiekosten, umfassen, gegliedert. Bei der Vergleichskostenrechnung handelt es sich um ein statisches Verfahren, welches Wertveränderungen über der Zeit (Zinsen) nicht berücksichtigt (STIEGLER 1999, S. 143).

Im Rahmen der statischen Amortisationsrechnung wird der Zeitraum ermittelt in dem das eingesetzte Kapital aus den durchschnittlichen Rückflüssen oder den Einzahlungsüberschüssen des Objekts wiedergewonnen wird (GÖTZE 2008, S. 63). Die Amortisationszeit berechnet sich dabei durch den Quotienten aus eingesetztem Kapital und den durchschnittlichen, auf einen Zeitraum und das Investitionsobjekt bezogenen Rückflüsse. Vorteilhafter bei der Bewertung von Investitionsalternativen ist die Lösung mit der kürzeren Amortisationsdauer.

Ein dynamisches Verfahren der Investitionskostenrechnung ist die Kapitalwertmethode, welche die Verzinsung des eingesetzten Kapitals explizit integriert. Zielgröße der Bewertung ist der Kapitalwert, engl. Net Present Value (NPV), der die Summe aller auf einen Zeitpunkt ab- bzw. aufgezinsten Ein- bzw. Auszah-

lungen, die durch die Realisation eines Investitionsobjekts verursacht werden, bildet (GÖTZE 2008, S. 71, SCHÄFER 2005, S. 114 ff.). Der Kapitalwert evaluiert den Totalerfolg einer Investition, d. h. den Erfolg, den eine Investition über den gesamten Nutzungszeitraum erwirtschaftet, berechnet auf den Zeitpunkt null, also auf den Zeitpunkt unmittelbar vor Investitionsbeginn. Als vorteilhaft ist eine Investition einzustufen, wenn ihr Kapitalwert positiv oder gleich null ist (BECKER 2009, S. 61).

#### **Cisek 2004**

CISEK erarbeitete am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München eine Methodik für die Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. Gegliedert ist diese in Module für das kennzahlenbasierte Monitoring und die Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen, für die Planung und für die Bewertung von Rekonfigurationen (2005, S. 56). Die Entwicklung und die simulative Optimierung von alternativen Produktionsstrukturen als Ziel der Rekonfigurationsmaßnahme sind Kerninhalte des Planungsmoduls. Ein eigenständiges Betriebsmittel stellt dabei die kleinste betrachtete Einheit dar. Die Rekonfiguration von Betriebsmitteln und die Betriebsmittelplanung werden nicht berücksichtigt (CISEK 2005, S. 75 ff.).

Das entwickelte Bewertungsmodul hat zwei wesentliche Funktionen. Zum einen dient es der Bewertung unterschiedlicher Strukturalternativen, um eine Entscheidungsfindung im Planungsprozess zu unterstützen. Hierzu werden die Veränderungen in der Kostenstruktur, die sich aus der Rekonfiguration ergeben, ermittelt. Dies erfolgt durch eine Abschätzung der Leistungskosten, also der Kosten, die sich entsprechend der erbrachten Leistung verändern, und der Bereitschaftskosten, die sich rein aus der prinzipiellen Bereitstellung von Potenzialfaktoren wie etwa Personal oder Maschinen ergeben (CISEK 2005, S. 101 ff.). Die Abschätzung wird durch Berechnung oder durch die Nutzung von Ablaufsimulation, die die Varianz des Produktionsprogramms, nicht deterministische Transportwege und Ressourcenauslastung berücksichtigt, unterstützt (CISEK 2005, S. 107).

Zum anderen ermöglicht das Bewertungsmodul eine Beurteilung des Aufwands für eine Rekonfigurationsmaßnahme. Hierbei wird zwischen dem statischen Einsatz für die Durchführung der Maßnahme und den dynamischen Kosten für die Unterbrechung der Produktion aufgrund der Rekonfigurationsmaßnahme unterschieden (CISEK 2005, S. 108 ff.). Die Erfassung des statischen Aufwands und



---

der damit verbundenen Kosten erfolgt relativ grob über die Personalkostensätze der notwendigen Mitarbeiter für die Maßnahme und den Kostensätzen für eventuell benötigte Transportmittel. Diese werden mit dem prognostizierten Aufwand verrechnet. Der Aufwand für die technische Modifikation von Betriebsmitteln wird im Rahmen der Bewertung nicht berücksichtigt. Der dynamische Aufwand wird über die Kosten für die Kompensation der rekonfigurationsbedingten Produktionsausfälle errechnet. Fremdvergabe von Produktionsvolumen oder die Durchführung von Sonderschichten im Vorfeld der Maßnahme sind hierbei typisch.

### **Möller 2008**

Möller präsentiert eine Methode für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme, die Unsicherheiten mittels des Ansatzes der Realoptionen integriert. Der Begriff Option entstammt der Finanzmathematik und beschreibt das Recht bzw. die Möglichkeit, ein Wertpapier mit schwankendem Kurswert zu einem bestimmten Zeitpunkt zu definierten Bedingungen kaufen oder verkaufen zu können. Diese Optionen unterliegen dem Risiko schwankender Kurse und sind durch Flexibilität, Unsicherheit und Irreversibilität charakterisiert. Der Realoptionenansatz überträgt das Optionsmodell auf Entscheidungen in realen Unternehmen, die ebenfalls durch Flexibilität, Unsicherheit und Irreversibilität gekennzeichnet sind (HOMMEL & PRITSCH 1999).

Die Methode ist in die Stufen Modellierung, Bewertung und Analyse gegliedert. Die Erfassung und Beschreibung der Umfeld-, Kosten- und Optionsprofile ist der Kerninhalt der Modellierung. Basis für die Erstellung der Profile sind dabei neben einem Umfeldmodell, welches sich am Rezeptorenmodell (siehe 3.2.1) orientiert, ein Kostenmodell und die prinzipiellen Handlungsmöglichkeiten (MÖLLER 2008, S. 90 ff.). Das Optionsprofil modelliert die möglichen Rekonfigurationsalternativen und das Kostenprofil beschreibt die entsprechenden Kosten. Eine detaillierte Betrachtung der technischen Maßnahmen und der damit verbundenen Kosten findet nicht statt, die notwendigen Aufwände werden als Einmalkosten berücksichtigt, den Investitionen zugerechnet und nicht näher spezifiziert (MÖLLER 2008, S. 100). Ausgehend von der Modellierung erfolgt die Bewertung in drei Stufen. Im Anschluss an die Basisbewertung, die mit starren Zukunftsszenarien arbeitet, werden die Realoptionen priorisiert und dann berechnet (MÖLLER 2008, S. 112 ff.). Die Analysephase dient der Entscheidungsfindung, ob eine iterative Wiederholung der Bewertung notwendig ist, der Ergeb-

nisaufbereitung und -darstellung und der Entscheidungsfindung (MÖLLER 2008, S. 153 ff.).

### **3.5 Fazit und Handlungsbedarf**

Die Ausführungen zeigen, dass das Thema wandlungsfähige und rekonfigurierbare Produktionssysteme in der wissenschaftlichen Gemeinschaft aufgrund der veränderten Anforderungen an produzierende Unternehmen eine große Rolle spielt. Die wissenschaftlichen Grundlagen zur Definition von Wandlungsfähigkeit im Kontext eines turbulenten Umfelds und in Beziehung zum häufig nicht trennscharf verwendeten Begriff der Flexibilität wurden erläutert. Die Systemeigenschaften, die die Wandlungsfähigkeit eines Systems begünstigen, die sogenannten Wandlungsbefähiger, wurden vorgestellt und diskutiert. Hierbei zeigt sich, dass die mangelnde Kompatibilität bzw. Interoperabilität der Systeme wesentliches Hemmnis für eine wirtschaftliche Rekonfiguration von automatisierten Produktionsanlagen ist.

Des Weiteren wurden relevante Beiträge aus Wissenschaft und industrieller Praxis zum Thema Kompatibilität von Komponenten in Produktionssystemen diskutiert. Neben Grundlagen zur industriellen Kommunikation wurden übliche Bussysteme der Automatisierungstechnik erläutert und wissenschaftliche Konzepte, die darauf abzielen, den Aufwand für Rekonfigurationsmaßnahmen in Produktionssystemen zu minimieren, präsentiert.

Ergänzend wurden Arbeiten vorgestellt, die sich mit der Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen beschäftigen. Diese bieten in erster Linie Vorgehensmodelle für die Planung und Methoden für die Bewertung von Planungsalternativen.

Ausgehend von den wissenschaftlichen Vorarbeiten und industriellen Lösungsansätzen konnte eine Reihe von Defiziten identifiziert werden. Ein fundamentaler Kritikpunkt an den wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema Wandlungsfähigkeit ist deren theoretische Betrachtungsebene und der oftmals fehlende Bezug zur konkreten technischen Gestaltung und Planung bzw. Entwurf von Betriebsmitteln. Lediglich für den Bereich der Werkzeugmaschine existieren Arbeiten, die sich mit der konkreten technischen Ausgestaltung beschäftigen.

Zudem lässt sich feststellen, dass die Ansätze zur Vereinheitlichung von Kommunikationsschnittstellen und -architekturen zwar eine Reduzierung der am Markt etablierten Busprotokolle erreichen konnten, aber noch keine weiterge-

---

hende und herstellerunabhängige Kompatibilität erzielt haben. So ist erkennbar, dass Automatisierungshersteller spezifische und oftmals proprietäre Kommunikationsprotokolle nutzen, um sich Marktanteile zu sichern und offenen Wettbewerb zu verhindern.

Die existierenden Arbeiten zur Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen zielen, ähnlich wie die Beiträge zur Wandlungsfähigkeit, auf eine abstrakte und strategische Ebene oder exkludieren explizit automatisierte Produktionssysteme. Konkrete Vorgehensweisen für die technische Systemgestaltung fehlen auch hier und die operative Planung wird demgemäß nicht ausreichend methodisch unterstützt.

Zusammenfassend lässt sich folgender Handlungsbedarf konstatieren: Um zukünftigen Herausforderungen in der automatisierten Produktion von Fahrzeugkarosserien, wie sie in Kapitel 2 beschrieben wurden, erfolgreich begegnen zu können, werden neue Anforderungen an die technische Betriebsmittelplanung gestellt. Konkret ist dies die Aufgabenstellung, technische Lösungen zu entwerfen, zu bewerten und zu realisieren, die es ermöglichen nicht kompatible Systeme und Komponenten der automatisierten Anlagentechnik zu verbinden um so Integrations- und Wiederverwendungsprojekte erfolgreich realisieren zu können. Diese Aufgabe erfordert aufgrund der inhärenten technischen Komplexität und der erheblichen Bedeutung für eine erfolgreiche Projektdurchführung neue Methoden und Modelle, um die ausführenden Mitarbeiter in der technischen Planung ausreichend zu unterstützen.



---

## **4 Anforderungen an die Methodik**

### **4.1 Allgemeines**

Wie in der Einleitung dargelegt, ist es das übergeordnete Ziel dieser Arbeit, die Weiter- und Wiederverwendung von Anlagentechnik in hochautomatisierten Produktionssystemen, vornehmlich im automobilen Karosseriebau als volkswirtschaftlich bedeutenden Industriebereich, zu fördern. Die Grundlagen der Produktion von Karosserien wurden im Kapitel 2 vorgestellt und aktuelle Herausforderungen, die sich maßgeblich aus einem verschärften wirtschaftlichen Wettbewerb und einer zunehmenden Individualisierung der Produkte ergeben, wurden erläutert. Hieraus konnte klar die Notwendigkeit zur aufwandsarmen Beherrschung von Rekonfigurationsmaßnahmen abgeleitet werden. Aktuelle Ansätze aus Wissenschaft und Industrie, die eine aufwandsarme Rekonfiguration von automatisierten Produktionsanlagen unterstützen, sind Inhalt des dritten Kapitels. Neben theoretischen Betrachtungen zur Wandlungsfähigkeit wurde das Thema technische Kompatibilität von Systemen und Komponenten in Produktionsanlagen sowie Ansätze für die Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen behandelt. Abschließend wurden die Defizite der bestehenden Ansätze in Bezug auf die vorgestellten Herausforderungen diskutiert und der Handlungsbedarf identifiziert.

Konkretes Ziel dieser Arbeit ist die Bereitstellung einer Methodik, die die Entwicklung, Bewertung und Realisierung von technischen Lösungskonzepten für die Rekombination von nicht-kompatiblen Komponenten und Systemen in automatisierten Produktionsanlagen unterstützt. Kapitel 4 beschreibt die Anforderungen, die die Grundlage für die Methodik darstellen. Dabei werden in einem ersten Schritt die grundsätzlichen Anforderungen und anschließend die spezifischen Anforderungen an eine Planungsmethode erläutert.

### **4.2 Grundsätzliche Anforderungen**

Grundsätzliche Anforderungen beschreiben Eigenschaften von zu entwickelnden Systemen, Methoden oder Modellen, deren Gültigkeit von der konkreten Aufgabenstellung und dem speziellen Einsatzzweck unabhängig sind. Tabelle 1 zeigt die grundsätzlichen Anforderungen an die Planungsmethodik.

*Tabelle 1: Grundsätzliche Anforderungen an die Methodik*

Nr.	Beschreibung
GA1	Anwendbarkeit
GA2	Praxistauglichkeit

Anwendbarkeit ist gekennzeichnet durch einen systematischen Verfahrensablauf, durch einfache Durchführbarkeit und Reproduzierbarkeit des Gesamtvorgehens. Erkennbare Strukturen, ein der Planungsphase angemessener Detaillierungsgrad sowie die Übertragbarkeit auf andere Problemstellungen und Branchen fördern die Praxistauglichkeit. Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer industriell einsetzbaren Methodik, somit sind die grundsätzlichen Anforderungen auf Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit in Industrieunternehmen zu erweitern.

Da die Methodik unter anderem Modelle zur Beschreibung realer Systeme und Zusammenhänge umfasst, sind in Tabelle 2 grundlegende Anforderungen an Modelle aufgeführt.

*Tabelle 2: Grundsätzliche Anforderungen an Modelle*

Nr.	Beschreibung
MA1	Abbildend
MA2	Vereinfachend
MA3	Pragmatisch

Grundsätzlich sind Modelle abbildend zu gestalten. Dies bedeutet, dass sie das zu modellierende Original, in der Regel ein reales System, abbilden und repräsentieren. Attribute des ursprünglichen Systems sind in Modellattribute zu überführen. Des Weiteren besitzen Modelle vereinfachende Eigenschaften. So werden nur die Aspekte und Eigenschaften eines realen Objektes abgebildet, die Relevanz für den Modellierungszweck besitzen. Modelle sind stets pragmatisch auszuführen, dienen also einem konkreten Zweck und der Erreichung einer definierten Zielsetzung. Unterschieden werden Modelle daher hinsichtlich ihres Zwecks häufig in Beschreibungs-, Erklärungs-, Entscheidungs- und Gestaltungsmodelle (WERTH 2007, S. 71 ff.).

---

### 4.3 Spezifische Anforderungen

Im Gegensatz zu den grundsätzlichen beschreiben die spezifischen Anforderungen, welche Funktionen bzw. welche Leistungen das zu entwickelnde System konkret erbringen muss. Die Anforderungen skizzieren dabei ausgehend von den Herausforderungen lösungsneutral, welche Funktionen zu realisieren sind und gliedern sich in die Hauptschritte der Problemlösung Identifikation/Analyse, Konzepterstellung, Bewertung und Umsetzung. Tabelle 3 zeigt die spezifischen Anforderungen an die Methodik.

*Tabelle 3: Spezifische Anforderungen an die Methodik*

Nr.	Beschreibung
SA1	Identifikation und Spezifizierung von Integrationsbedarfen...
SA1.1	...in Integrationsprojekten
SA1.2	...bei der Wiederverwendung von Komponenten
SA2	Erstellung technischer Integrationskonzepte für Komponenten
SA2.1	Geringer Aufwand
SA2.2	Transparente Vorgehensweise
SA2.3	Wiederverwendung bestehender Lösungen
SA2.4	Funktionssicherheit und Verfügbarkeit
SA3	Bewertung technischer Integrationskonzepte für Komponenten
SA3.1	Kostenbewertung
SA3.2	Bewertung nicht-monetärer Effekte
SA4	Bereitstellung notwendiger Daten und Dokumente...
SA4.1	...für die Planung und Erstellung
SA4.2	...für den Betrieb

Ausgehend von der Problemstellung, dass Planungsprojekte des Karosseriebaus aufgrund der Verschiedenartigkeit der Systemelemente und der hohen Anzahl insbesondere im Bereich der technischen Anlagengestaltung eine hohe Komplexität besitzen, ist es notwendig, die Analysephase hinsichtlich der Identifikation und Spezifikation der Integrationsaufgabe zu unterstützen. Unter Identifikation ist dabei das systematische Erkennen von Handlungsbedarfen zu verstehen. Die Spezifikation umfasst die konkrete, einheitliche und ausreichend detaillierte Beschreibung des Handlungsbedarfs in einer Form, die die spätere Lösungsfindung

fördert. Neben Integrationsprojekten sind Wiederverwendungsszenarien auf Komponentenebene zu betrachten.

Die Erstellung notwendiger technischer Integrationskonzepte ist die Hauptfunktion der entwickelten Methodik. Hierbei sind folgende Aspekte zu berücksichtigen. Die Konzepterstellung muss aufwandsoptimal erfolgen. Dies bedeutet, unnötige Prozessschritte zu vermeiden und die notwendigen Aktivitäten so zu unterstützen, dass ein möglichst geringer Aufwand für deren Bewältigung notwendig ist. Dabei ist es unerlässlich, die Funktionssicherheit der entwickelten Lösung zu gewährleisten. Aufgrund der großen Bedeutung des Karosseriebaus, dessen einzelne Anlagen logisch in Reihe angeordnet sind, im automobilen Produktionsverbund ist es unbedingt notwendig, dass keine Unterschreitung der projektspezifisch festgelegten Verfügbarkeit erfolgt. Die Wiederverwendung von existierenden Lösungen ist zu fördern, um geringe Entwicklungsaufwände und die Nutzung bereits erprobter Techniken zu realisieren. Transparente Prozesse sind, besonders aufgrund der inhärenten Komplexität von Planungs- und Entwicklungsprojekten, anzustreben.

Wie in 4.2 beschrieben, ist die Methodik für den Einsatz in Unternehmen der Industrie zu konzipieren. Die Entscheidungsfindung unterliegt dort wirtschaftlichen Aspekten. Daher ist es notwendig eine möglichst umfassende Bewertung der Kosten für eine entwickelte Lösung zu ermöglichen. Da eine reine Kostenbewertung nie alle relevanten Einflussfaktoren integrieren kann, soll zusätzlich im Rahmen des Alternativenvergleichs eine Einbeziehung qualitativer Kriterien erfolgen.

Die Realisierung bzw. Umsetzung der entwickelten Lösungskonzepte ist durch die Bereitstellung notwendiger Daten und Dokumente zu unterstützen. Hierbei gilt es, neben den spezifischen Bedarfen der Planungs- und Inbetriebnahmephase auch die Betriebsphase über den gesamten Einsatzzeitraum zu berücksichtigen.



---

## **5 Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik**

### **5.1 Allgemeines**

Kapitel 5 dieser Arbeit dient der Darstellung der entwickelten Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik automatisierter Produktionsanlagen. Hierbei wird erst eine Übersicht über die einzelnen Teilelemente und die Wirkungsweise der Methodik gegeben und dann die Vernetzung der einzelnen Module dargestellt. Anschließend werden die einzelnen Teilelemente detailliert erläutert und spezifiziert.

Die Entwicklung der Methodik erfolgte im Rahmen eines bilateralen Forschungsprojekts welches, vom Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München und einem Fahrzeughersteller durchgeführt wurde. Die Vorgehensweise war dabei induktiv ausgehend von konkreten Problemstellungen der industriellen Praxis. Auf Basis der konkreten Aufgabenstellungen des Unternehmens wurden spezifische Lösungsansätze entwickelt und validiert. Diese wurden anschließend abstrahiert und in generischer Form für die universelle Anwendung erweitert. Hierbei wurde entwicklungsbegleitend die Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit durch die Einbeziehung von realen Anwendungsfällen sichergestellt. In Abschnitt 5.7 wird die Übertragbarkeit auf Einsatzszenarien außerhalb der Automobilindustrie diskutiert.

### **5.2 Übersicht Methodik**

Prinzipiell stellt die entwickelte Methodik eine Ergänzung zu bestehenden Vorgehensweisen und Methoden der Planung und Anlagengestaltung dar, die die konkrete Aufgabe der Kopplung bzw. Integration von nicht kompatiblen Komponenten oder Systemen in Rekonfigurationsprojekten unterstützt. Der Anwender, adressiert werden in erster Linie Mitarbeiter der technischen Betriebsmittelplanung, wird dabei über ein Vorgehensmodell, welches vier Phasen umfasst, durch den Prozess geführt und nutzt unterschiedliche Beschreibungs- und Bewertungsmodelle sowie eine Lösungsbibliothek. Wie für eine Methodik charakteristisch weisen die unterschiedlichen Teilelemente einen hohen Vernetzungsgrad

## 5 Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik

---

auf. Abbildung 24 zeigt die Kernelemente der entwickelten Methodik in einer Übersicht (REINHART & MELING 2012).

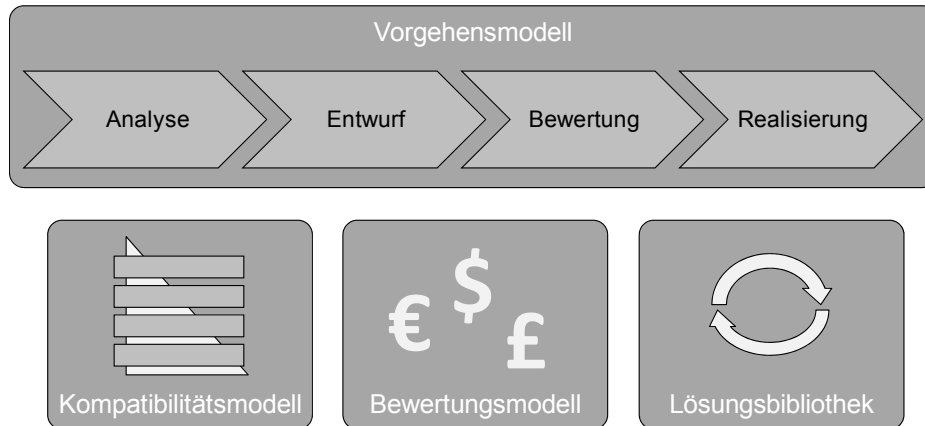


Abbildung 24: Übersicht Methodik

Zentrales Element der Methodik ist ein Vorgehensmodell, welches das Vorgehen in vier Hauptschritten darstellt. Diese sind, einem klassischen Entwicklungsvorgehen entsprechend, Analyse, Entwurf, Bewertung und Realisierung. Das Vorgehensmodell wird in Abschnitt 5.6 dieser Arbeit detailliert erläutert. Weiterer wesentlicher Hauptbestandteil der Methodik ist das Kompatibilitätsmodell. Es dient der Klassifizierung und Beschreibung der Schnittstellen von automatisierten Komponenten und Systemen. Eine ausführliche Erläuterung des Modells findet sich in Abschnitt 5.3. Zum Zweck der Lösungsevaluierung schließt die Methodik ein Bewertungsmodell, welches monetäre und nicht-monetäre Aspekte integriert, ein. Abschnitt 5.4 beinhaltet die Vorstellung des Bewertungsmodells. Um die Entwicklungsaufwände zu minimieren, die Wiederverwendung zu fördern und die Optimierung bereits entwickelter Lösungen zu erleichtern, ist eine Lösungsbibliothek, die in Abschnitt 5.5 spezifiziert wird, Teil der Methodik.

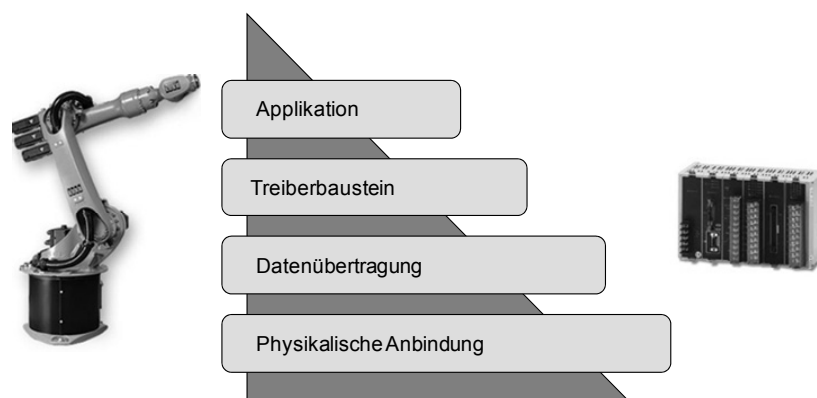
### 5.3 Technisches Kompatibilitätsmodell

Ein wesentliches Element der entwickelten Methodik ist das technische Kompatibilitätsmodell. Dieses Modell dient der Beschreibung der Schnittstellen automatisierter Komponenten und Systeme der Anlagentechnik auf technischer und funktionaler Ebene. Der Fokus der Betrachtung liegt auf der Informationstechnik und Datenverarbeitung.

---

### 5.3.1 Übersicht Modell

Das Kompatibilitätsmodell orientiert sich an dem in der Informationstechnik weit verbreiteten ISO/OSI-Modell, welches die Kommunikation von unterschiedlichen Systemen beschreibt. Das hier vorgestellte Modell stellt eine aufgabenspezifische Adaption und Erweiterung des etablierten ISO/OSI-Modells dar. Eine Abgrenzung findet sich in Abschnitt 5.3.3 der Arbeit. Grundfunktion des Modells ist die strukturierte und der Aufgabe entsprechend detaillierte Beschreibung des Kommunikationsverhaltens einer anlagentechnischen Komponente oder eines Systems. Abbildung 25 zeigt das Kompatibilitätsmodell in einer Übersichtsdarstellung.



*Abbildung 25: Übersicht Kompatibilitätsmodell*

Wie die ISO/OSI-Architektur ist das vorgestellte Modell in Ebenen strukturiert. Jede Ebene beschreibt hierbei Teilaspekte der Kompatibilität von Systemen der Automatisierungstechnik. Die unteren Ebenen berücksichtigen dabei die physikalische Anbindung und die Datenübertragung, Aspekte der Ansteuerung und der funktionalen Einbindung bzw. Applikation werden in den übergeordneten Ebenen realisiert. Das Grundprinzip des Modells ist ein hierarchischer Aufbau, übergeordnete Ebenen greifen auf Funktionen zu, die in unterlagerten Ebenen bereitgestellt werden. Die einzelnen Ebenen des Modells, die physikalische Anbindung, die Datenübertragung, die Ebene Treiberbaustein und die Ebene Applikation werden im Folgenden erläutert.

### 5.3.2 Ebene 1: Physikalische Anbindung

Ziel der Modellierung einer Schnittstelle auf Ebene 1 des Kompatibilitätsmodells ist die Spezifikation der physischen Verbindung zweier Komponenten. Beschrieben werden dabei die „angreifbaren“ Elemente der Verbindungstechnik, wie Stecker, Leitungsquerschnitte und die Basisspezifikation der Signalübertragung. Die Ebene 1 „Physikalische Anbindung“ des Kompatibilitätsmodells entspricht damit weitgehend der Schicht 1 des ISO/OSI-Modells und legt die Bitübertragung zwischen Komponenten und Systemen der Automatisierungstechnik fest, erweitert diese aber um echte physikalische Aspekte, die das ISO/OSI-Modell explizit ausschließt. Diese Übertragung erfolgt dabei in der Regel leitungsgebunden über elektrische oder optische Signale oder leitungsungebunden über elektromagnetische Wellen. Spezifiziert werden die Eigenschaften in dieser Ebene über die Bauform von Steckelementen, Ausprägung von Leitungen und Frequenz- bzw. Spannungsbereiche für die Signalübertragung. Abbildung 26 zeigt typische Ausprägungen von Steckverbindungen zur Übertragung elektrischer Signale in der Anlagentechnik des Karosseriebaus.

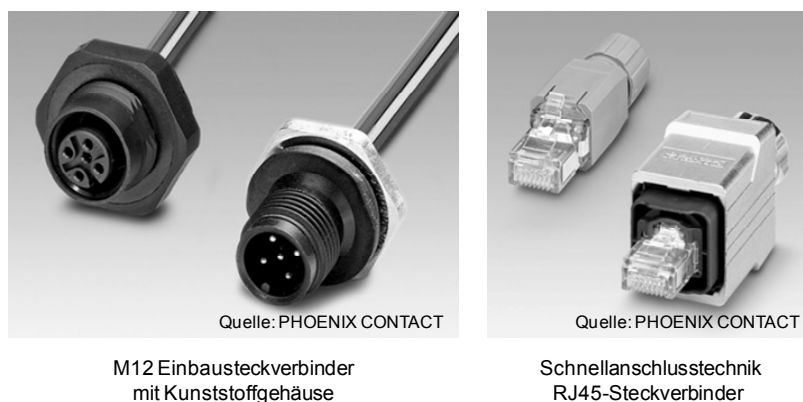


Abbildung 26: Beispiele für Steckverbindungen

### 5.3.3 Ebene 2: Datenübertragung

Die Spezifikation der Übertragung von Daten von einem Kommunikationsteilnehmer zum anderen ist Aufgabe der zweiten Ebene des Kompatibilitätsmodells. Dazu werden die Schichten 2 bis 6 des ISO/OSI Modells zusammengefasst (siehe Abbildung 27). Diese Zusammenfassung macht in dem hier betrachteten Anwendungsfall Sinn, da in der Automatisierungstechnik, wie bereits in Abschnitt 3.3.3 erläutert, eine Reihe von standardisierten und etablierten Busprotokollen existiert.

tiert. Diese Busprotokolle vereinheitlichen die entsprechenden Schichten des ISO/OSI Modells und werden von den Komponentenherstellern angewendet. Beispiele für solche Busprotokolle sind Profinet, Profibus oder Interbus. Diese Busprotokolle stellen im Folgenden die kleinste betrachtete Einheit auf dieser Ebene dar. Unterschieden werden nur unterschiedliche Versionen bzw. Varianten der Busprotokolle. Erwähnenswert ist hierbei, dass bei einigen Bussystemen die Ebene 1 und 2 nicht getrennt voneinander betrachtet werden können. So erfordern eine Reihe industriell eingesetzter Bussysteme spezifische Stecker- und Leitungstechnik.

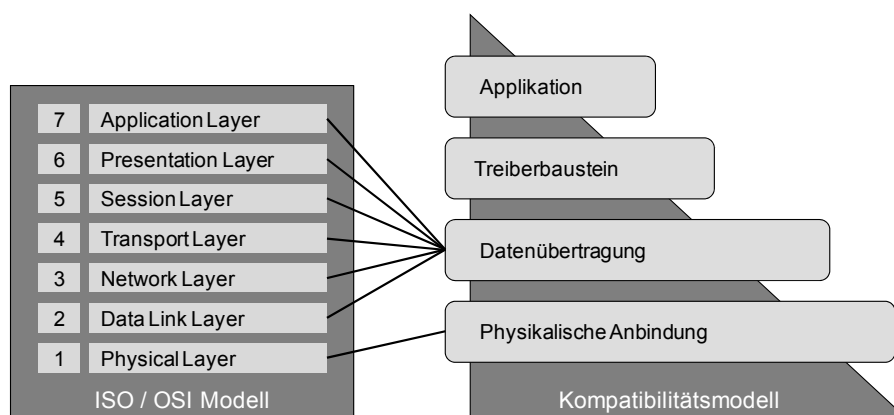
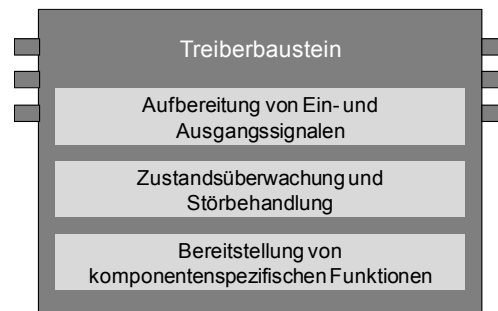


Abbildung 27: Integration des ISO/OSI-Modells in das Kompatibilitätsmodell

### 5.3.4 Ebene 3: Treiberbaustein

Die Ebene 3 des Kompatibilitätsmodells beschreibt die Einbindung einer Hardwarekomponente in die Softwareumgebung eines Steuerungssystems. In der Anlagentechnik, die durch speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) geprägt ist, wird die Treiberfunktionalität in der Regel über komponentenspezifische Funktionsbausteine (FB) realisiert. Diese Bausteine übernehmen dabei drei Hauptfunktionen (siehe Abbildung 28).



*Abbildung 28 Hauptfunktionen von Treiberbausteinen*

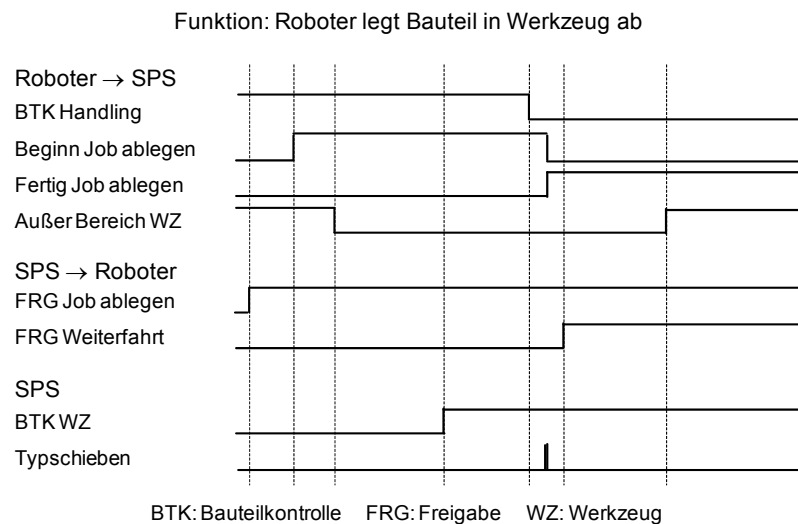
Die Aufbereitung von Ein- und Ausgangssignalen umfasst neben der Adressierung die Skalierung bzw. Normierung der entsprechenden komponentenspezifischen Signale. Falls notwendig erfolgt eine Digitalisierung der Eingangssignale für die weitere Verarbeitung. Zusätzlich zur Signalaufbereitung ist die Bereitstellung von komponentenspezifischen Funktionen eine Kernaufgabe von Treiberbausteinen. Häufig wiederkehrende Folgen von Ansteuer- und Parametrierungsaufgaben werden dabei zu einfach handhabbaren Funktionen zusammengefasst und dem Nutzer zur Verfügung gestellt.

Eine weitere Hauptfunktion von Treiberbausteinen ist die Zustandsüberwachung und Fehlerbehandlung von Komponenten der Anlagentechnik. Die Überwachung der Betriebszustände erfolgt dabei über den Vergleich ausgewählter Signale mit vorgegebenen Sollwerten. Werden Fehlersituationen erkannt, stellen Treiberbausteine die für die Fehleranzeige und Ursachendiagnose notwendige Information zur weiteren Verarbeitung durch andere Programmteile bereit. Teilweise sind sicherheitsrelevante Funktionen, wie ein definiertes Verhalten von Komponenten in Not-Aus- bzw. Not-Halt-Situationen, ebenfalls in Treiberbausteinen umgesetzt.

### **5.3.5 Ebene 4: Applikation**

Die vierte und höchste Ebene des Kompatibilitätsmodells umfasst die Applikation, also die Anwendung bzw. Nutzung der betreffenden Komponenten in einem konkreten Produktionsszenario. Die Ebene 4 beschreibt dabei im Gegensatz zur Ebene 3 nicht den Signalverkehr, sondern definiert das Ansteuerverhalten auf logischer und funktionaler Ebene. Hierbei stehen die Interaktion und die zeitliche Abfolge des Signalaustausches mit anderen Komponenten und Systemen im Vordergrund.

Um die logische Ansteuerung von Komponenten im steuerungstechnischen Umfeld zu beschreiben, werden neben textuellen Beschreibungen häufig sogenannte Signalfluss-Diagramme verwendet. Abbildung 29 zeigt ein solches Diagramm, welches exemplarisch die Interaktion und Kommunikation eines Roboters bei der Operation „Bauteil ablegen“ zeigt.



*Abbildung 29: Beispiel für ein Signalflussdiagramm*

Die generelle Beschreibung des Signalspiels in Signalflussdiagrammen wird in der Ebene 4 des Kompatibilitätsmodells durch weitere spezifische Informationen zur logischen Ansteuerung der Komponente ergänzt. Dies können beispielsweise Vorgaben sein, wie eine Komponente in die Ablaufsteuerung einer Gesamtanlage einzubinden ist. Abbildung 30 zeigt beispielhaft Vorgaben für die Ansteuerung eines Roboters aus einer als Sequential Function Chart (SFC) bzw. Schrittkette realisierten Ablaufsteuerung in einem SPS Programm.

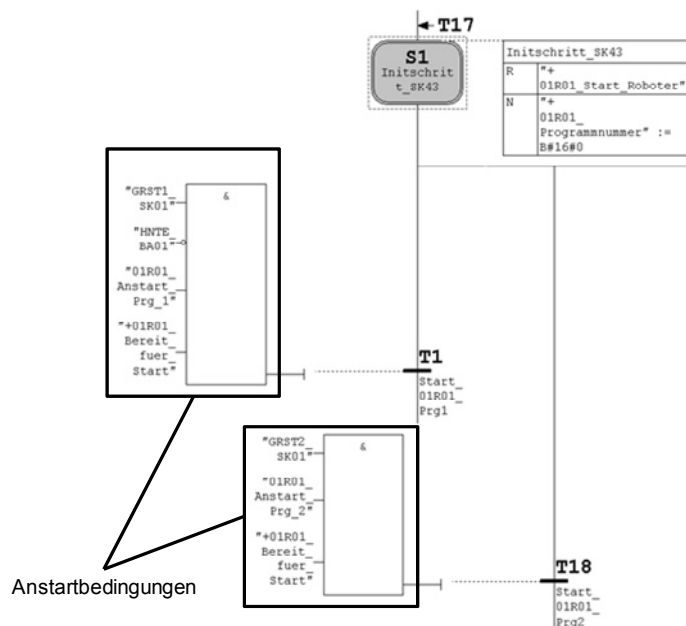


Abbildung 30: Einbindung einer Komponente in eine zentrale Ablaufsteuerung

Die Abgrenzung zwischen Ebene 3 und Ebene 4 des Kompatibilitätsmodells erfolgt über die jeweils spezifizierten Inhalte. Die Ebene 3 umfasst die hardwarenahe Ansteuerung und Signalverarbeitung sowie stark komponentenbezogene Funktionen. Aspekte der Ansteuerung, die die funktionale Einbindung der Komponente in das Gesamtsystem oder die Interaktion mit anderen Komponenten im Anlagenverbund betreffen, sind Inhalt der Ebene 4.

## 5.4 Bewertungsmodell

Um eine industrielle Anwendbarkeit der Methodik zu gewährleisten, ist es unabdingbar, die Evaluation von entwickelten Lösungselementen methodisch zu unterstützen. Eine aufwandsarme, strukturierte und damit transparente Bewertung wurde durch das im Folgenden erläuterte Bewertungsmodell ermöglicht. Dieses setzt sich aus einer monetären und einer nicht-monetären Bewertung sowie einer ganzheitlichen Betrachtung für den Vergleich alternativer Kopplungslösungen zusammen.



---

### 5.4.1 Monetäre Bewertung

Die monetäre Bewertung der Kopplungslösungen ist für die Auswahl von Lösungsalternativen und die wirtschaftliche Realisierung derselben unbedingt erforderlich. Um die monetäre Bewertung aufwandsarm umsetzen zu können, wird im Folgenden ein entsprechendes Kostenmodell eingeführt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in Unternehmen in der Regel etablierte Verfahren der Investitionskostenrechnung existieren und eine Kompatibilität der Bewertungsverfahren anzustreben ist. Das im Rahmen des Projektes erarbeitete Modell orientiert sich im Wesentlichen an einer Vollkostenbetrachtung, die alle im Lebenszyklus auftretenden Kosten integriert. Abbildung 31 zeigt das monetäre Bewertungsmodell in einer Übersichtsdarstellung.

Das Modell für die monetäre Bewertung von Kopplungslösungen setzt sich aus den drei Elementen Einmalkosten, proportionale Kosten und Betriebskosteneffekte zusammen. Die Einmalkosten beschreiben dabei Aufwände, die bei Einsatz der Lösung einmalig notwendig sind. Typische Beispiele für solche Kosten sind Entwicklungsaufwendungen oder Ausgaben für Experimente und Tests. Zu beachten ist hierbei, dass diese nur bei der erstmaligen Erstellung einer Lösung auftreten. Neben den Einmalkosten sind die proportionalen Kosten bei der monetären Bewertung zu berücksichtigen. Diese Kosten sind in der Regel Aufwände für Hardwarekomponenten oder Montage- bzw. Inbetriebnahmeleistungen, die proportional zur Häufigkeit des Lösungseinsatzes anfallen. Neben den Einmalkosten und den proportionalen Kosten vervollständigen die Betriebskosteneffekte das monetäre Bewertungsmodell. Kosten, die über die gesamte Einsatzdauer der Lösung auftreten, werden über dieses Element erfasst. Beispiele für Betriebskosteneffekte sind dabei ein erhöhter Instandhaltungsaufwand oder Verfügbarkeitseinbußen durch den Einsatz einer Kopplungslösung. Die Betriebskosteneffekte steigen proportional zur Einsatzdauer.

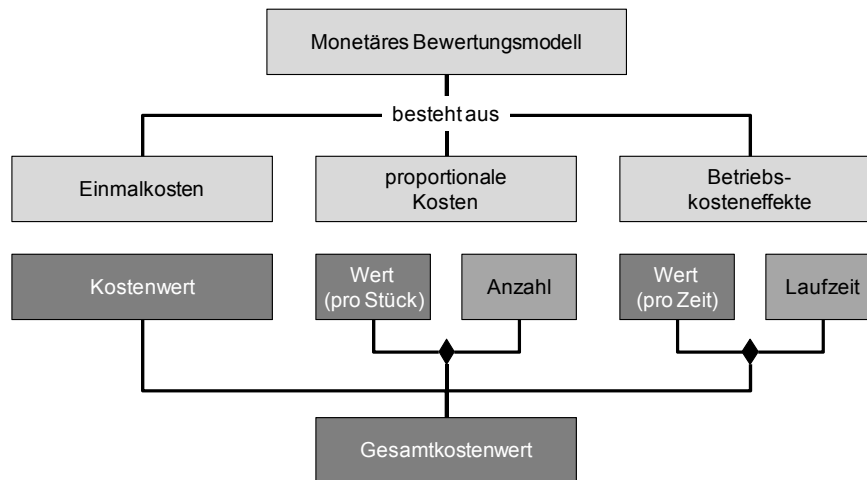


Abbildung 31: Übersicht monetäres Bewertungsmodell

Die monetäre Bewertung über das Kostenmodell verfolgt das Ziel, einen Gesamtkostenwert für eine Lösungsalternative zu ermitteln. Dazu werden die entsprechenden Kostenwerte der einzelnen Modellelemente ermittelt und summarisch verknüpft. Zu beachten ist hierbei, dass die proportionalen Kosten und die Betriebskosteneffekte mit den projektspezifischen Werten für die Anzahl der notwendigen Lösung und der geplanten Anlagenlaufzeit verrechnet werden müssen. Um eine Vergleichbarkeit der Gesamtkostenwerte unterschiedlicher Lösungsalternativen zu gewährleisten, ist bei der Bewertung eine einheitliche Basis aus projektspezifischen Kenngrößen heranzuziehen, falls eine Bewertung anhand der Werte aus dem Zielprojekt nicht möglich ist.

### 5.4.2 Nicht-monetäre Bewertung

Ziel der nicht-monetären Bewertung ist es, Kriterien, deren Einfluss sich nicht quantitativ beurteilen lassen, zu berücksichtigen und in die Gesamtbewertung zu integrieren. Die Bewertung der nicht-monetären Aspekte erfolgt über eine Nutzwertanalyse. Dabei wird eine Auswahl von qualitativen Kriterien in einem Punktesystem von eins bis zehn bewertet. Eins stellt hierbei einen sehr schlechten, zehn einen sehr guten Erfüllungsgrad dar. Über Faktoren findet dann eine Gewichtung der einzelnen Kriterien statt. Der Gesamtnutzwert einer Lösung wird über eine Summation der einzelnen gewichteten Teilnutzwerte der Kriterien gebildet. Die vergleichende Bewertung von Alternativlösungen erfolgt durch die Verwendung identischer Kriterien mit gleicher Gewichtung. Abbildung 32 zeigt beispielhaft eine Lösungsbewertung anhand einer Reihe von exemplarischen

qualitativen Kriterien in einer Tabelle zur Ermittlung des Gesamtnutzwertes einer Lösung.

Nutzwertanalyse: Lösung XYZ				
Kriterium		Gewichtung	Bewertung*	Teilnutzen
1	Ausfall- und Störungssicherheit	20%	7	1,40
2	Ergonomie Betreiber	10%	5	0,50
3	Ergonomie Instandhaltung	10%	8	0,80
4	Ergonomie Aufbau / Inbetriebnahme	10%	3	0,30
5	Wandlungsfähigkeit / Flexibilität	10%	5	0,50
6	Umsetzbarkeit / Akzeptanz	10%	1	0,10
7	Einschränkung Anlagenkonzept	20%	8	1,60
8	Nachhaltigkeit	10%	3	0,30
Summe der Teilgewichtungen:		100%	Ø Nutzwert:	5,50

\* zulässige Werte: 0 (nicht erfüllt) bis 10 (voll erfüllt)

Abbildung 32: Nutzwertanalyse qualitativer Kriterien

Grundsätzlich sind die Kriterien entsprechend der spezifischen Projektziele und Anforderungen an die Lösung auszuwählen und die zugehörigen Gewichtungen festzulegen. Diese Definition der Bewertungsgrößen ist Inhalt der Phase Bewertung des Vorgehensmodells und basiert auf den Ergebnissen der Analysephase. Im Folgenden werden Orientierungsgrößen, die als Basis für die Konkretisierung der Kriterien verwendet werden können, erläutert. Grundlage für diese Orientierungsgrößen sind Erfahrungswerte aus der konkreten Umsetzung entsprechender Rekonfigurationsprojekte.

Eine wesentliche Messgröße für die qualitative Bewertung ist die *technische Güte* einer Lösung. Diese evaluiert die Komplexität eines Lösungskonzeptes unter Berücksichtigung der Anzahl und Verschiedenartigkeit der Elemente sowie deren Relationen. Bezogen wird dieses Kriterium häufig auf spezifische Teilaspekte beispielsweise die physischen Umfänge, wie Baugruppen und Installation, oder rein virtuelle Gesichtspunkte, wie Softwarestrukturen oder die informationstechnische Anbindung an übergeordnete Systeme der Produktionssteuerung oder Betriebsdatenerfassung.

Zusätzlich zur technischen Güte ist die *Ergonomie* einer Lösung eine wichtige Orientierungsgröße für die nicht-monetäre Bewertung. Diese umfasst die Eigenschaften einer Lösung, die die benutzergerechte Bereitstellung notwendiger Funktionen ermöglicht. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Umfeld die Einbeziehung unterschiedlicher Benutzergruppen, wie beispielsweise Inbetriebnehmer, Qualitätsverantwortlicher, Instandhalter oder Werker. Auf-

grund der teilweise konkurrierenden Anforderungen der einzelnen Benutzergruppen ist häufig eine gruppenspezifische Bewertung notwendig.

Die *Konformität mit Projektprämissen* kann als zusätzliche Orientierung dienen und sollte in jedem Fall zur Definition konkreter Bewertungskriterien herangezogen werden. So wird sichergestellt, dass übergeordnete strategische Ziele bei der Evaluation berücksichtigt werden.

Unter dem Aspekt *Betriebbarkeit* einer technischen Lösung werden Kriterien abgeleitet, die den Produktivbetrieb einer Lösung betreffen. Die Anforderungen der Instandhaltung, wie beispielsweise Zugänglichkeit, Optimierbarkeit und Konformität zu etablierten Systemen, werden hier integriert. Zusätzlich können Themen der Ausfall- und Störsicherheit berücksichtigt werden, welche die Robustheit einer Lösung im Produktionsbetrieb beschreiben. Hierbei können Erfahrungswerte und Expertenwissen in die Bewertung einfließen. Dies ist insbesondere von Bedeutung, da für wieder- oder weiterverwendete Komponenten mit heterogenen Nutzungsprofilen in der Regel keine von Herstellerseite garantierten Kennzahlen zur Verfügbarkeit und Lebensdauer vorliegen.

Grundsätzlich ist es sinnvoll, bei der nicht-monetären Bewertung auch die *Offenheit und Erweiterbarkeit* als Suchraum für die Festlegung von Kriterien hinzuzuziehen und diesen Aspekt ausreichend zu gewichten. Die Eigenschaften von Lösungen sich veränderten Anforderungen anzupassen, ist essenziell für die Einsetzung im volatilen Umfeld.

### 5.4.3 Ganzheitliche Bewertung und Auswahl

Die ganzheitliche Bewertung dient der Verknüpfung der Ergebnisse der monetären und der nicht-monetären Bewertung einer oder mehrerer alternativer Lösungen. Der beschriebene Ansatz zur Verknüpfung von Kostenwerten mit den Ergebnissen einer qualitativen Bewertung lehnt sich an das von MÜLLER im Rahmen seiner Arbeiten zur Bewertung von Produktionsalternativen vorgestellte Verfahren an (2008, S. 124 ff.). Die Evaluation erfolgt anhand eines Portfolios, welches die qualitativen und quantitativen Ergebnisse integriert. Abbildung 33 zeigt ein solches Portfolio exemplarisch.

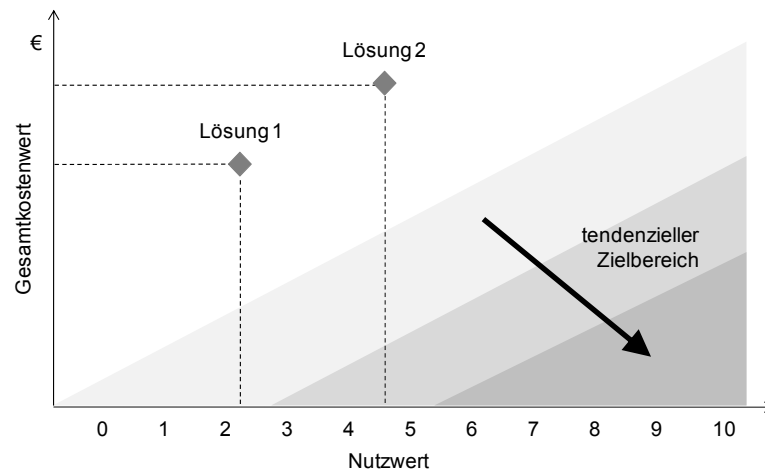


Abbildung 33: Ganzheitliche Bewertung von Lösungsalternativen

Die Abszisse bildet bei dieser Darstellung die Resultate der Nutzwertanalyse zur Bewertung in einer Skala von 0 bis 10 ab. Auf der Ordinate werden die Gesamtkostenwerte der Lösung aufgetragen. Ein Vergleich unterschiedlicher Lösungen ist über diese Darstellung einfach möglich. Der tendenzielle Zielbereich der idealen Lösung ist durch hohe Nutzwerte und geringe Kosten charakterisiert.

## 5.5 Lösungsbibliothek

Ein weiterer Bestandteil der entwickelten Methodik ist das Modul Lösungsbibliothek. Aufgabe und Ziel des Moduls ist die Unterstützung der Wiederverwendung und die geordnete Verwaltung bereits erstellter Lösungen. Erreicht wird dies durch eine Datenbank, welche die Möglichkeit zur strukturierten Speicherung, Recherche, Bearbeitung und Ausleitung der relevanten Daten bietet. In einem ersten Schritt wird hierzu die grundlegende Charakteristik und Struktur einer Kopplungslösung vorgestellt. Anschließend werden ausgehend vom Einsatzzweck der Lösungsbibliothek konkrete Anforderungen an das Datenbanksystem formuliert und das Datenbanksystem erläutert. Abschließend erfolgt eine kurze Vorstellung des erarbeiteten Prototyps.

### 5.5.1 Lösungselement

Eine einzelne Lösung, die in der Lösungsbibliothek abgelegt wird, spezifiziert die Kopplung zweier nicht kompatibler Systemelemente der Anlagentechnik. Das

## 5 Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik

Lösungselement integriert dabei die technische Lösung, die monetären Effekte und die nicht-monetären Einflüsse. Abbildung 34 zeigt den Aufbau eines Lösungselements für die Kopplung von Anlagentechnikkomponenten und Systemen.

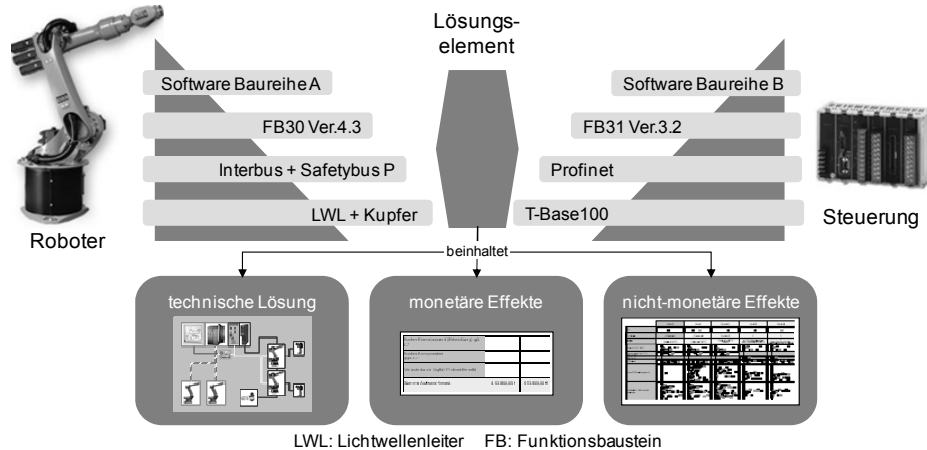


Abbildung 34: Übersicht Lösungselement

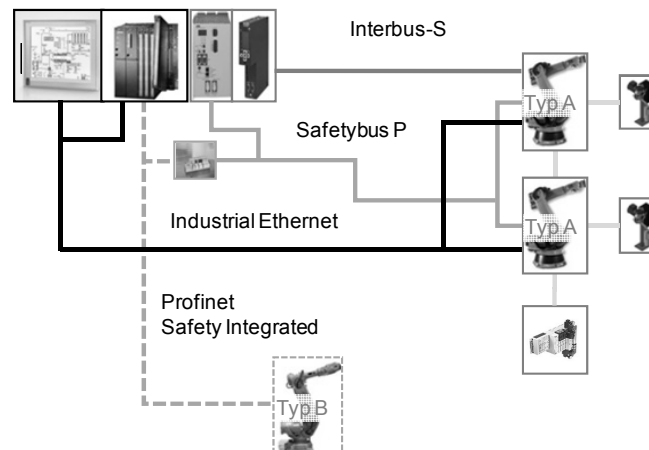
Die technische Lösung beschreibt dabei, mit welchen Bauteilen, Techniken, Softwareelementen und Maßnahmen die Kompatibilität zwischen unterschiedlichen Systemen hergestellt wird. Sie ist ein detailliertes Konzept für die Lösung einer Kopplungsaufgabe. Die Teilelemente monetäre und nicht-monetäre Effekte beinhalten die Eigenschaften einer Lösung für die Evaluation mittels des in 5.4 vorgestellten Bewertungsmodells.

### Teilelement: Technische Lösung

Wesentlicher Bestandteil und Kern einer Kopplungslösung ist das Teilelement technische Lösung, welches spezifiziert, wie zwei nicht kompatible Komponenten oder Systeme gekoppelt werden können. Gegliedert ist das Lösungskonzept in ein allgemeines Grobkonzept und mehrere Detaillösungen, die fachspezifisch ausgeführt sind. Unter fachspezifischen Lösungen sind dabei die Lösungskonzepte der beteiligten Einzeldisziplinen der Anlagentechnik, nämlich Mechanik, Elektrotechnik und Steuerungssoftware, zu verstehen.

Das Grobkonzept ist ein mechatronischer also disziplinübergreifender Entwurf, wie die Kopplung unterschiedlicher Komponenten erfolgen kann. Die Darstellung des Entwurfs erfolgt in der Regel über Konzeptskizzen und durch textuelle Beschreibungen. Abbildung 35 zeigt eine Übersichtsdarstellung eines Kopp-

lungskonzepts exemplarisch. Wichtig bei der Spezifikation des Konzeptentwurfs ist die Bezugnahme auf die Anforderungen an die Lösung. Sinnvoll ist es hierbei, die Relationen zwischen Anforderungen und entsprechenden Lösungseigenschaften klar zu erläutern. Dies ermöglicht eine einfache Adaption der Lösung im Wiederverwendungsfall.



*Abbildung 35: Lösungskonzept Übersicht*

Das Grobkonzept der Kopplungslösung stellt die Basis für die Einzellösungen der beteiligten Fachdisziplinen dar. Diese Detaillösungen sind ebenfalls Bestandteil des Lösungselements und sind die Weiterentwicklung und Auskonstruktion der Lösungsidee.

In der Mechanik wird beschrieben, wie die mechanische Kopplung der Komponenten erfolgt. Relevante Dokumente sind dabei Konstruktions- und Fertigungszeichnungen, Stücklisten, Pneumatikpläne und ergänzende Beschreibungen. Insgesamt ist die Mechanik bei der Kopplung von Komponenten und Systemen als wenig kritisch einzustufen. Dementsprechend gering ist der anteilige Umfang der spezifischen Dokumente an der Kopplungslösung.

Die Elektrotechnik, die in der Lösungsfindung ebenso wie die Steuerungssoftware von zentraler Bedeutung ist, spezifiziert die fachspezifische Lösung mittels einer Reihe von Dokumenten. Stücklisten und Konzeptbilder zeigen, wie Komponenten zu kombinieren und welche Zusatzbauteile, wie etwa Gateways zur Verbindung unterschiedlicher Bussysteme, notwendig sind. Die exakte Verkabelung der Einzelbauteile ist in Stromlauf- und Steckerbelegungsplänen dargestellt. Beschreibungstexte geben zusätzliche Informationen, wie etwa Parametereinstellungen, wieder. Ergänzt wird das Lösungskonzept durch Vorlagen und Hand-

## 5 Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik

---

lungsanweisungen für die projektspezifische Umsetzung der Lösung. Abbildung 36 zeigt beispielhaft ein elektrotechnisches Konzeptbild zur sicherheitstechnischen Kopplung zweier Komponenten.

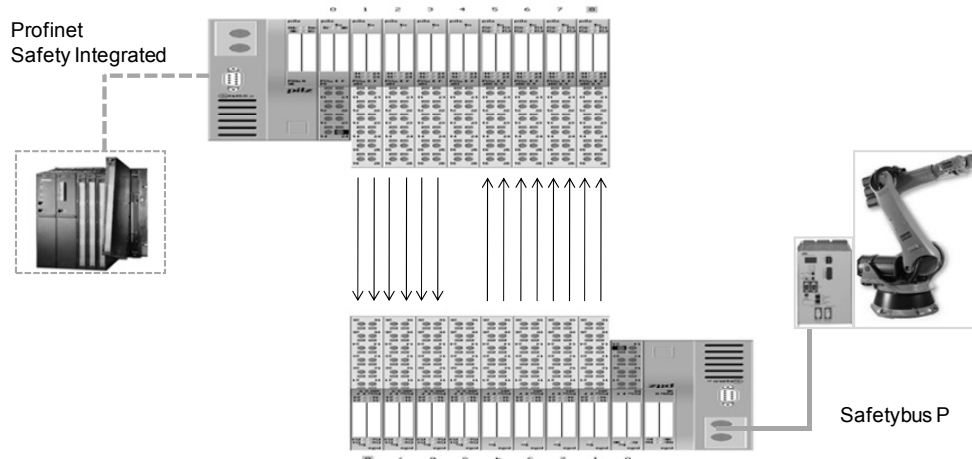


Abbildung 36: Konzeptbild Elektrotechnik Sicherheit

Im Bereich Steuerungssoftware ist die Detaillösung in der Regel in Form von Funktionsbausteinen realisiert. Diese Funktionsbausteine dienen dazu, den Signalaustausch von Komponenten auf Softwareebene und die Einbindung in neue Programmarchitekturen zu ermöglichen. Neben Funktionsbausteinen sind Richtlinien für deren Einsatz, Beschreibungen, Musterprogramme und Vorlagen die relevanten Daten und Dokumente.

Hinweise und Beschreibungstexte zur Fertigung, Montage, Installation und Inbetriebnahme der Kopplungslösung ergänzen das Teilelement und unterstützen die Umsetzung in Projekten. Zusätzlich werden im Teilelement technische Lösung weitere Informationen hinterlegt. Beispiele hierfür sind unter anderem Ergebnisse von Tests und Experimenten im Freigabeprozess oder technische Randbedingungen und Einschränkungen. Organisatorische Informationen wie Angaben zum Ersteller oder Versions- bzw. Varianteninformationen vervollständigen das Teilelement der Kopplungslösung.

### **Teilelement: Kosten**

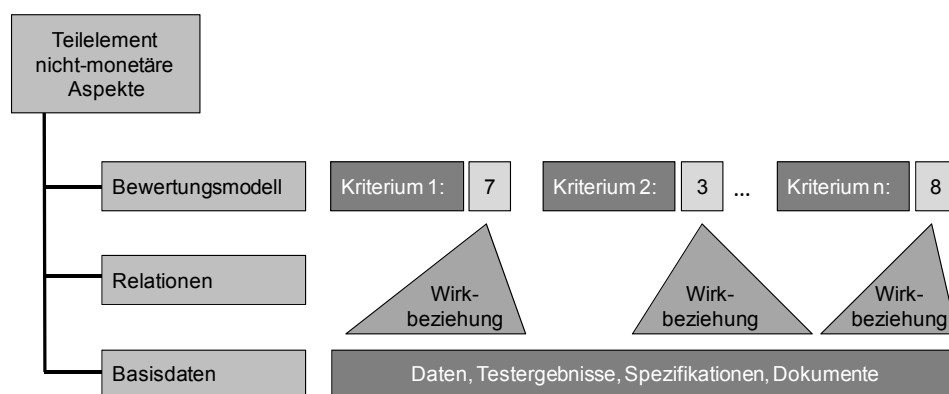
Das Teilelement Kosten ist ein weiterer Bestandteil der Kopplungslösungen. Das Teilelement stellt dabei jeweils eine lösungsspezifische Ausprägung des in 5.4.1 vorgestellten Modells zur monetären Bewertung dar.



Neben den einzelnen Kenngrößen zur Kostenbeurteilung der Lösung sind auch zugehörige Daten und Dokumente in der Lösungsbibliothek abzulegen. Kaufteillisten mit Preisen und Informationen zur kaufmännischen Abwicklung, Verhandlungsergebnisse oder Ausarbeitungen zur Erfassung der Lebenszykluskosten sind hier exemplarisch zu nennen.

### **Teilelement: Nicht-monetäre Aspekte**

Das Teilelement nicht-monetäre Aspekte der Lösung dient dazu, die qualitativen Gesichtspunkte einer entwickelten Lösung abzubilden und für eine spätere Wiederverwendung zu speichern. Das in 5.4.2 vorgestellte Bewertungsmodell zur Berücksichtigung nicht-monetärer Effekte ist dabei eine wesentliche Einflussgröße. Abbildung 37 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Teilelements nicht-monetäre Aspekte.



*Abbildung 37: Teilelement nicht-monetäre Aspekte*

Das Teilelement setzt sich dabei aus den spezifischen Ergebnissen für die unterschiedlichen Einzelkriterien, den Basisdaten und den entsprechenden Relationen zusammen. Unter Basisdaten sind alle Informationen, Daten und Dokumente zu verstehen, die für die Bewertung herangezogen werden. Die Relationen beschreiben, wie, ausgehend von den Basisdaten, die Einzelergebnisse im Bewertungsmodell abgeleitet werden. Nach der Umsetzung der Lösung in Projekten ist es notwendig, die Ergebnisse der nicht-monetären Bewertung anhand der realen Erfahrungen zu validieren und eventuelle Korrekturen durchzuführen. So dient die Speicherung der Ergebnisse der nicht-monetären Bewertung inklusive der Entscheidungsgrundlage einer nachhaltigen Wissensarchivierung und Erfahrungsbildung. Bei der Wiederverwendung bestehender Kopplungslösungen können die bereits vorhandenen Ergebnisse der nicht-monetären Bewertung transpa-

rent gemacht und nachvollzogen werden. Zudem ist es so möglich, bei veränderten qualitativen Bewertungskriterien auf Grundlage der Basisdaten neue Ergebnisse abzuleiten. Der Bewertungsaufwand bei der Wiederverwendung kann so bei gesteigerter Aussagekraft gesenkt werden.

### 5.5.2 Funktionale Anforderungen an die Lösungsbibliothek

Die funktionalen Anforderungen an die Lösungsbibliothek wurden im Rahmen der Arbeiten auf Basis von exemplarischen Use-Cases erarbeitet. Diese stellen typische Anwendungsfälle, wie beispielsweise das Einpflegen einer neuen Lösung in die Bibliothek, die Bearbeitung eines existierenden Ansatzes oder die Recherche vorhandener Konzepte, dar. Ausgehend von den Use-Cases lassen sich die funktionalen Anforderungen an die Lösungsbibliothek ableiten. Tabelle 4 zeigt diese Anforderungen, die im Wesentlichen aus grundsätzlichen Funktionen von Datenbanksystemen aufgebaut sind.

*Tabelle 4: Funktionale Anforderungen Lösungsbibliothek*

	Beschreibung
FA1	Speichern von Lösungen und zugehörigen Daten
FA2	Möglichkeit der Suche nach Lösungen
FA3	Bearbeiten von gespeicherten Lösungen
FA4	Bereitstellen notwendiger Daten und Dokumente

Hauptaufgabe der Lösungsbibliothek ist die Speicherung von entwickelten Lösungen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die vollständige Archivierung aller Teilelemente der Kopplungslösung mitsamt aller zugehörigen Daten und Dokumenten. Zusätzlich sind Informationen für eine strukturierte Verwaltung der hinterlegten Elemente zu hinterlegen. Diese Informationen sind das Erstellungsdatum, der verantwortliche Ersteller und das Zielprojekt, in dem die Lösung eingesetzt wird. Neben der reinen Speicherung von Daten ist die Suche nach bestehenden Lösungen eine Kernfunktionalität der Lösungsbibliothek. Dabei ist es notwendig, nach unterschiedlichen Suchkriterien zu recherchieren. Die technischen Kriterien sind dabei die beteiligten Komponenten und Subsysteme und die zugehörigen Schnittstellen sowie die eingesetzten Techniken. Zudem ist eine Recherche nach begleitender Information, wie Erstellungsdatum, Einsatzprojekte und Ersteller, erforderlich. Die Ergebnisse der monetären und nicht-monetären Bewertung

---

sind ebenfalls zu berücksichtigen. Neben den Funktionalitäten Speichern und Recherche ist muss die Lösungsbibliothek die Bearbeitung der enthaltenen Elemente unterstützen. So können Erfahrungswerte aus der Realisierungsphase abgebildet und die Bewertungsergebnisse nach der Validierung optimiert werden. Das Ergänzen von zusätzlichen Informationen und die Aufnahme technischer Weiterentwicklungen sind so möglich. Die bedarfsorientierte Ausleitung notwendiger Daten und Dokumente ist eine weitere notwendige Funktion der Lösungsbibliothek.

### **5.5.3 Datenbankkonzept Lösungsbibliothek**

Die in Abschnitt 5.5.2 vorgestellten funktionalen Anforderungen an die Lösungsbibliothek bilden die Grundlage für das entwickelte Datenbankkonzept. Gegliedert ist dieses in den Entwurf einer grafischen Benutzeroberfläche und, wie im Datenbankentwurf üblich, eine Spezifikation der relevanten Objekt-, Daten-, Entwicklungs- und Aktionsschicht (SAAKE ET AL. 2010, S. 132 ff.).

Die statische Struktur der Datenbank wird durch die Objekt- und Datenschicht festgelegt. In der Objektschicht findet eine Modellierung der Objekte, Objekttypen und ihrer Beziehungen statt. In der Datenschicht werden die Definitionen der Wertebereiche von Attributen angegeben. Die dynamische Struktur wird zum einen durch die Aktionsschicht, die alle Funktionen, die einen Zugriff, oder auch eine Änderung des Datenbestandes erlauben, beschreibt, gebildet. Zum anderen spezifiziert die Entwicklungsschicht die zeitliche Veränderung des Datenbestands über die Nutzungsdauer der Datenbank. Da die Entwicklungsschicht betreffende Funktionalitäten heute von Datenbankmanagementsystemen bereitgestellt werden, wird diese Entwurfsebene im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr weiter betrachtet (VOSSEN 2008, S. 12 ff.).

#### **Objektschicht**

Um eine anforderungsgerechte Repräsentation der realen Lösungen in der Bibliothek zu gewährleisten, ist eine Strukturierung der Komponenten und der Lösungselemente entsprechend der Ebenen des Kompatibilitätsmodells (siehe 5.3) notwendig.

Eine Übersicht über die für die Datenbank relevanten Objektklassen und zugehörigen Relationen zeigt Abbildung 38 in der typischen Notation eines Klassendiagramms der Unified Modelling Language (UML). Zur Verbesserung der

## 5 Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik

Übersichtlichkeit werden die Datentypen nicht aufgeführt. Zudem wurde auf die Darstellung der weiteren Unterteilung der Elemente verzichtet. Der Aufbau der Unterelemente wird im Folgenden detailliert.

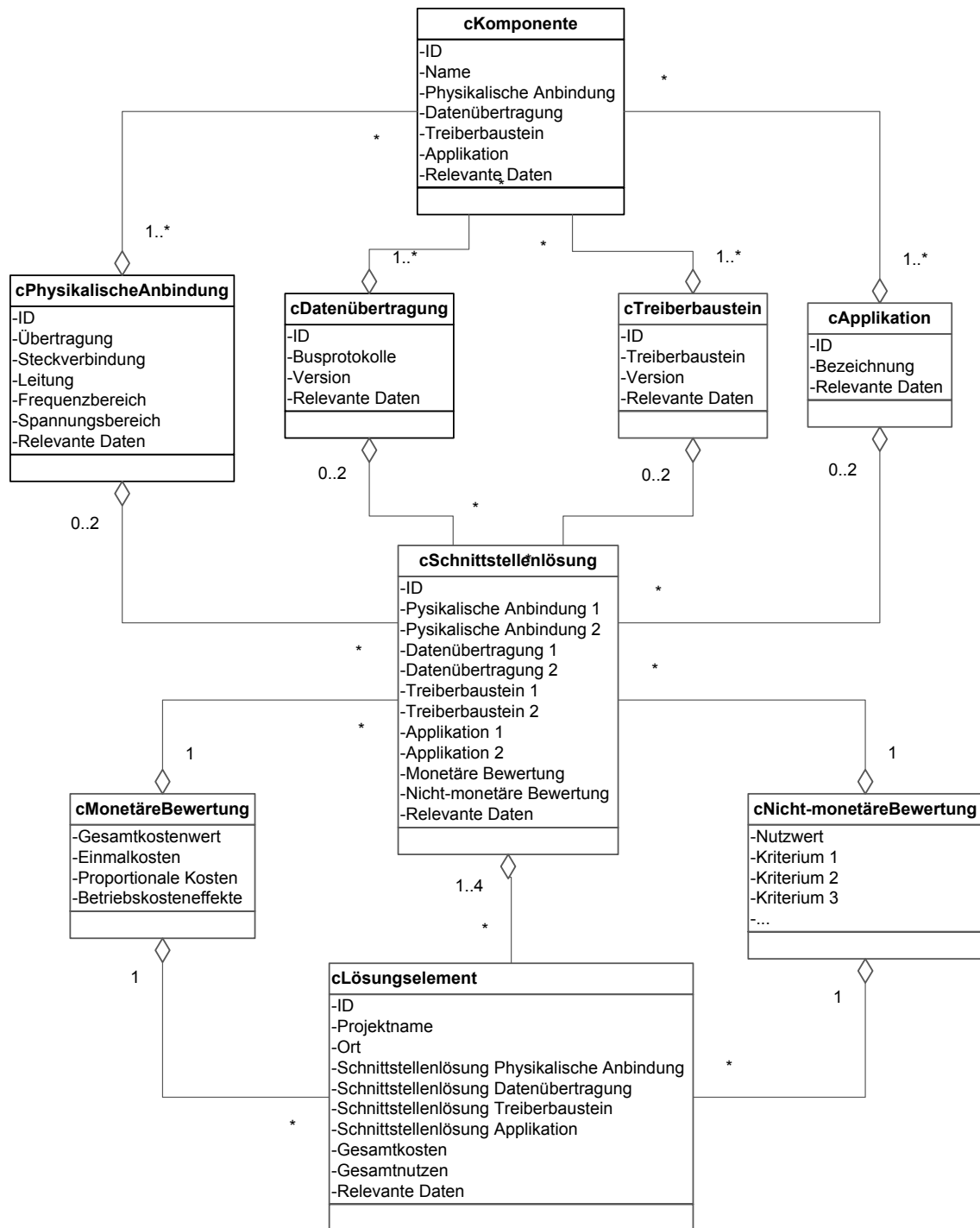


Abbildung 38: Klassendiagramm Datenbankobjekte

Um eine geordnete Speicherung von Lösungen zu realisieren, ist es notwendig, die strukturierte Ablage von Komponenten als Objekte in der Datenbank zu ermöglichen. Diesen werden die für die Kompatibilität charakteristischen Bestandteile *Physikalische Anbindung*, *Datenübertragung*, *Treiber* und *Applikation* als Objekte entsprechender Klassen zugeordnet. Die Klasse *Physikalische Anbindung* ist dabei durch die Attribute *Übertragungsart*, *Steckverbindung*, *Leitung*, *Frequenzbereich* und *Spannungsbereich* gekennzeichnet. Die Attribute werden hierbei wiederum als Klassen repräsentiert, um die Freiheitsgrade der konkreten Objektausprägung sinnvoll einschränken zu können. Wesentliche Attribute der Klasse *Datenübertragung* sind das *Busprotokoll* und die *Version*. Die Klasse *Treiberbaustein* ist durch die Attribute *Treiberbaustein* und *Version* charakterisiert. Die Klasse *Applikation* definiert das logische Ansteuerverhalten im steuerungstechnischen Umfeld über das Attribut *Bezeichnung*. Zudem besitzen die aufgeführten Klassen das Attribut *Relevante Daten*. Dabei handelt es sich um einen „Datencontainer“, der alle nötigen Informationen, wie Schaltpläne, Installationspläne, Anleitungen oder bei Lösungselementen eventuell auch Erfahrungsberichte enthält.

Lösungselemente sorgen für die Kopplung einzelner Kommunikationsebenen von inkompatiblen Komponenten und beschreiben neben technischen Lösungen auch die Ergebnisse der monetären und nicht-monetären Bewertung als Attribute, die über entsprechende Objektklassen definiert sind. Abbildung 39 zeigt das Klassendiagramm für die Objekte *Monetäre Bewertung* und *Nicht-monetäre Bewertung*.

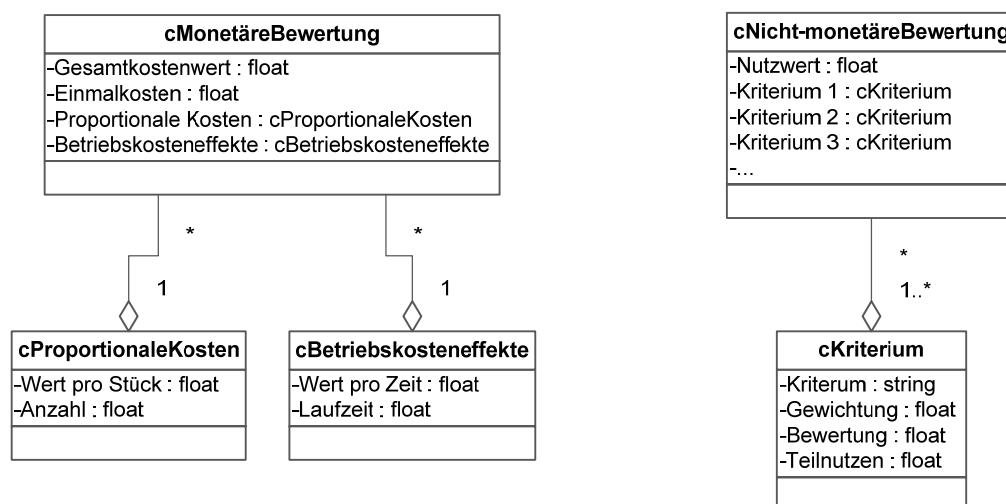


Abbildung 39: Klassendiagramm Bewertungsmodell

Die monetäre Bewertung setzt sich aus den Einmalkosten, den proportionalen Kosten und den Betriebskosteneffekten zusammen. Die proportionalen Kosten werden aus der Anzahl der benötigten Bauteile und dem Wert pro Stück gebildet. Die Betriebskostenwerte bestehen aus den Kosten pro Zeit und der Laufzeit. Da die Laufzeit eine wichtige Variable darstellt, besteht die Möglichkeit, diese auf der grafischen Benutzeroberfläche der Lösungsbibliothek einzugeben und so die Kosten anwendungsfallspezifisch zu aktualisieren.

Bei der nicht-monetären Bewertung werden alle Kriterien gespeichert, nach denen die Lösungen beurteilt werden. Dazu werden zudem die jeweilige Gewichtung mit entsprechender Bewertung und der errechnete Teilnutzen hinterlegt. Die Teilnutzen der verschiedenen Kriterien werden in der nicht-monetären Bewertung zum Nutzwert aufsummiert.

Eine weitere wesentliche Objektklasse des Datenbankkonzepts ist die *Komponente*. Diese besitzt mindestens eine physikalische Anbindung, eine Datenübertragung, einen Treiber und eine Applikation. Theoretisch kann eine Komponente auch über mehrere Anbindungen verfügen, z. B. eine digitale und eine analoge. Darum ist es zulässig, mehrere Attribute *Physikalische Anbindungen* oder auch *Datenübertragungen* einer *Komponente* zuzuordnen (siehe Abbildung 38).

Im Allgemeinen beschreibt das Objekt *Teillösung* die technische Kopplung zweier Schnittstellenelemente mit unterschiedlicher Ausprägung. Es besteht jedoch die Möglichkeit, weitere Schnittstellenelemente zu integrieren. Dies ist notwendig, da bestimmte Adapter oder Kopplungselemente in der Lage sind, die Kompatibilität zwischen physikalischer Anbindung und Datenübertragung oder weiteren Ebenen herzustellen. Zusätzlich sind die Bewertungsmodelle und die relevanten Daten Attribute der Objektklasse. Abbildung 40 zeigt das entsprechende Klassendiagramm.

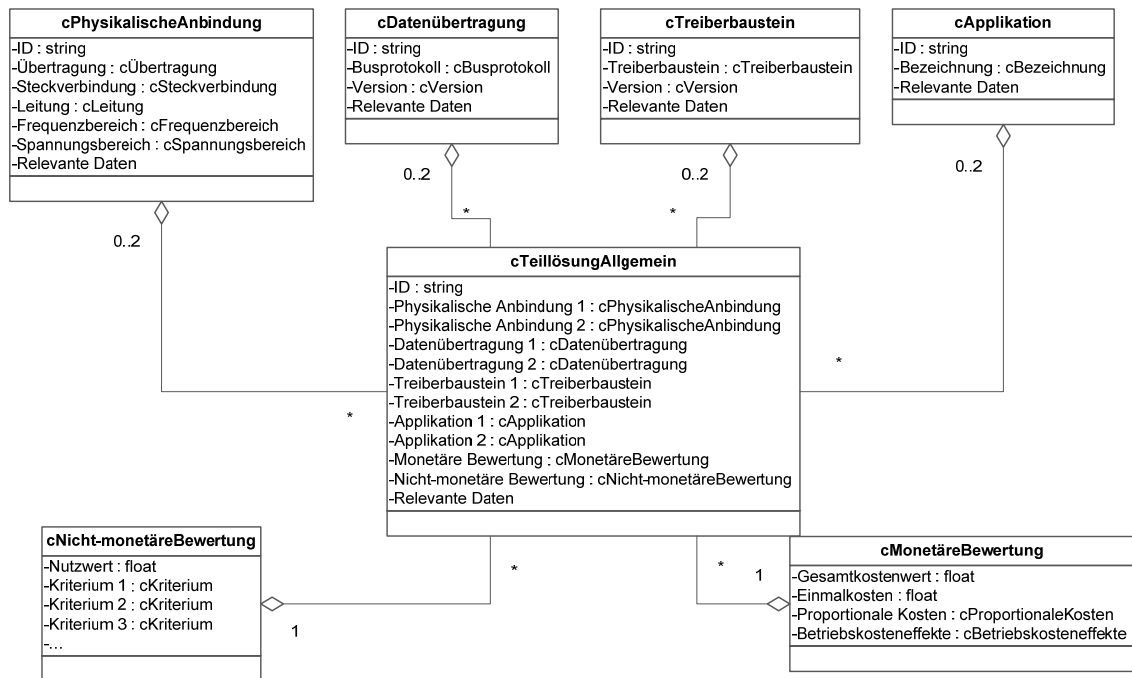


Abbildung 40: Klassendiagramm Teillösung

Eine vollständige Kopplungslösung der Objektklasse *Lösungselement* setzt sich aus bis zu vier Objekten der Klasse *Teillösungen* zusammen. Zusätzliche Attribute sind *Projektname* und der *Ort*, die den bisherigen Einsatz der Lösung näher spezifizieren.

### Datenschicht

Die in der Lösungsbibliothek verwendeten Datentypen entsprechen weitgehend dem Standard der Datenbanktechnik. Die Objektattribute sind durch Zeichenketten (Strings), Zahlenwerte (Float) und Ja/Nein-Abfragen (Boolean) definiert. Teilweise erfolgt eine Einschränkung der zulässigen Wertebereiche, um Inkonsistenzen aufgrund verschiedener Schreibweisen oder Bezeichnungen zu vermeiden. Den entsprechenden Attributen werden spezifische Datentypen mit eindeutigen Bezeichnungen zugewiesen.

Eine Besonderheit der Lösungsbibliothek in Bezug auf die Datenhaltung ist das Attribut *relevante Daten*. Dieses ist als Datencontainer konzipiert, welcher die Speicherung unterschiedlicher Datenformate erlaubt. So ist es möglich, unterschiedliche Daten, die für die Spezifizierung der entsprechenden Objekte notwendig sind, zu hinterlegen. Beispiele hierfür sind neben Textdokumenten, mechanische und elektrotechnische Konstruktionsdaten sowie Softwarebausteine und Programmmodule.

### **Aktionsschicht**

Die Aktionsschicht definiert die Aktionen, die die Lösungsbibliothek dem Benutzer zur Verfügung stellen muss. Die entsprechenden Funktionen werden spezifiziert und stellen die Grundlage für die Implementierung dar. Die Funktionen der Aktionsschicht sind in Tabelle 5 aufgeführt.

*Tabelle 5: Grundfunktionen Aktionsschicht*

Nr.	Beschreibung
F1	Komponente öffnen/anzeigen
F2	Datenbestand erweitern
F3	Datenbestand bearbeiten
F4	Datenbestand speichern
F5	Datenbestand löschen
F6	Lösungen suchen
F7	Lösungen vergleichen
F8	Daten exportieren

Die Spezifikation der einzelnen Funktionen erfolgt über Use-Case-Diagramme der Modellierungssprache UML. Abbildung 41 zeigt exemplarisch die Darstellung der Funktion „Lösungen vergleichen“. Die Funktion nutzt dabei die beiden Subfunktionen „Diagramm zeichnen“ und „Lösungselemente auswählen“. Letztere inkludiert die Funktion „zugehörigen Datenbestand anzeigen“.



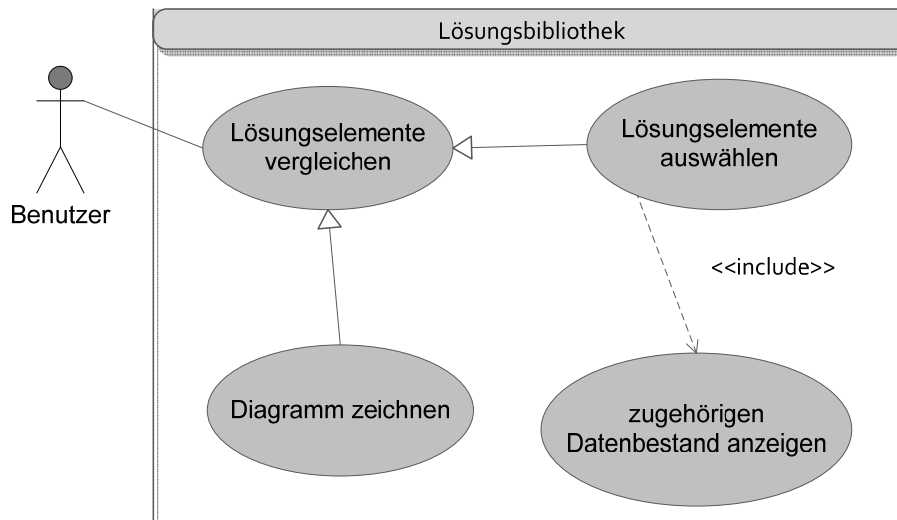


Abbildung 41: Funktion Lösungselemente vergleichen

### Prototypische Umsetzung

Die prototypische Umsetzung der Lösungsdatenbank erfolgte in der Entwicklungsumgebung Microsoft Access. Diese ist für die schnelle und aufwandsarme Implementierung von kleinen Datenbanklösungen und Softwareprototypen aufgrund der einfachen Bedienbarkeit und des hohen Verbreitungsgrades gut geeignet.

Kern der Implementierung ist eine grafische Benutzeroberfläche, die eine intuitive Bedienung ermöglicht und den Zugriff auf die unterschiedlichen Funktionen der Lösungsbibliothek realisiert. Abbildung 42 zeigt die entworfene Oberfläche des Hauptmenüs der Lösungsbibliothek, die in die Bereiche System 1, System 2 und Lösung sowie Funktionsaufrufe unterteilt ist. In den Systembereichen werden die Schnittstellen der zu koppelnden Komponenten dargestellt und die einzelnen Ebenen des Kompatibilitätsmodells beschrieben. Der Bereich Lösung dient der Visualisierung der Kopplungslösung und ist ebenfalls in vier Ebenen strukturiert. Der Aufruf der verfügbaren Funktionen, wie beispielsweise das Öffnen, Bearbeiten oder Speichern des Datenbestands, erfolgt über Buttons in der Benutzeroberfläche.

## 5 Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik

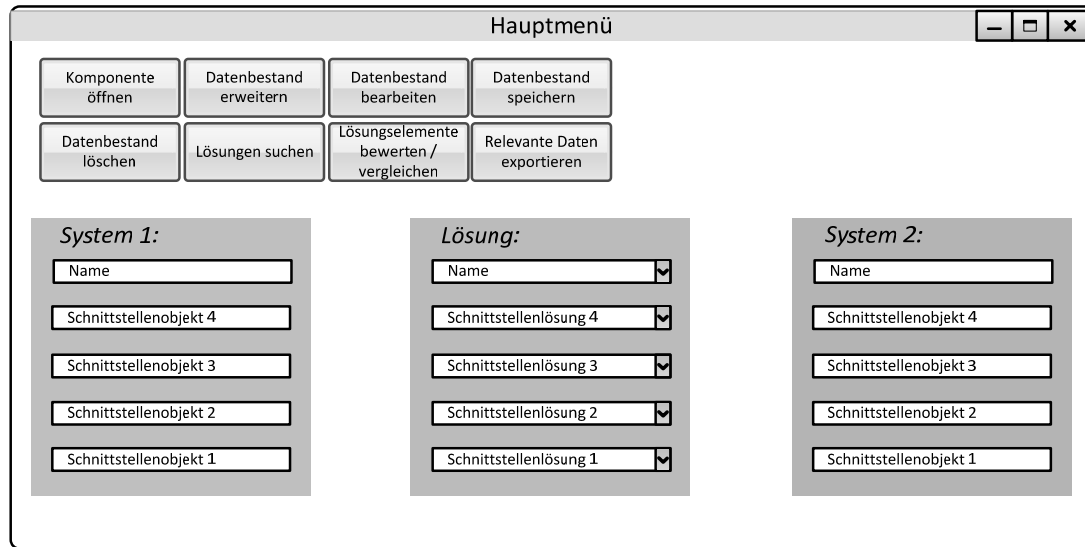
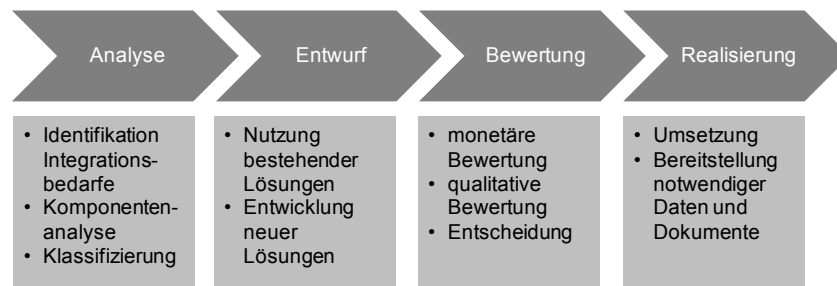


Abbildung 42: Benutzeroberfläche Hauptmenü

Die Funktionen „Datenbestand erweitern“ bietet dem Benutzer die Möglichkeit, neue Objekte in die Lösungsbibliothek einzupflegen. Neben der Definition von Schnittstellenobjekten und Elementen ist die Erstellung von Komponenten und Lösungselementen über die Eingabemaske „Datenbestand erweitern“ realisiert. Die Suche nach Lösungen erfolgt nach dem Laden der entsprechenden Komponenten über den Funktionsaufruf. Die Suchergebnisse werden im Feld Lösung des Hauptmenüs angezeigt. Falls in einer Ebene mehrere Lösungsalternativen vorliegen, so ist die Selektion durch den Benutzer über Auswahllisten möglich. Der Darstellung von Details zu den einzelnen Elementen dient ein Infocfeld, welches beim Klick auf Schnittstellenobjekte oder Lösungselemente eingeblendet wird und die Ausprägung der hinterlegten Objektattribute in einer Tabellendarstellung zeigt. Die Bewertung bzw. der Vergleich unterschiedlicher Lösungen erfolgt mittels einer eigenen Oberfläche, die über das Hauptmenü aufgerufen werden kann.

### 5.6 Vorgehensmodell

Hauptbestandteil der entwickelten Methodik ist ein Vorgehensmodell, welches beschreibt, wie eine aufwandsarme Kombination von anlagentechnischen Komponenten und Systemen erreicht werden kann. Die Phasen unterscheiden sich dabei hinsichtlich Inhalt und Zielsetzung deutlich. Eine Übersicht des Vorgehensmodells mit den Phasen Analyse, Entwurf, Bewertung und Realisierung und den zugehörigen Inhalten ist in Abbildung 43 dargestellt.



*Abbildung 43: Phasen und Inhalte Vorgehensmodell*

Neben der Beschreibung des Vorgehens verknüpft das Vorgehensmodell die Einzelmodelle und Elemente der Methodik. Abbildung 44 zeigt in welchen Phasen welche Teilelemente genutzt werden. Das technische Kompatibilitätsmodell wird vornehmlich in den Phasen Analyse und Entwurf angewendet. Die abgebildeten Inhalte kommen aber auch in der Bewertungs- und Realisierungsphase zum Einsatz. Das Bewertungsmodell ist Kernbestandteil der Bewertungsphase und dient dort der Lösungsbeurteilung und Auswahl. Die Lösungsbibliothek wird in den Phasen Entwurf, Bewertung und Realisierung genutzt.

Genutztes Element \ Phase	Analyse	Entwurf	Bewertung	Realisierung
Kompatibilitätsmodell	x	x		x
Bewertungsmodell			x	
Lösungsbibliothek		x	x	x

*Abbildung 44: Phasenspezifische Nutzung der Elemente*

Im Folgenden werden die einzelnen Phasen des Vorgehensmodells erläutert. Die spezifischen Ziele, Beteiligten, Eingangs- und Ausgangsinformationen und Aktivitäten werden detailliert beschrieben. Teilweise ist ein iteratives Wiederholen der einzelnen Phasen zur Erreichung optimaler Lösungsansätze notwendig.

### 5.6.1 Phase 1: Analyse

Die Analyse ist die initiale Phase des entwickelten Vorgehensmodells. Die Zielsetzung der Phase ist die Identifikation der notwendigen Integrationsaufgaben, die Analyse der beteiligten Komponenten und Subsysteme und die Spezifikation von Anforderungen an die zu entwickelnden Lösungsansätze. Abbildung 45 zeigt

## 5 Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik

---

Zielsetzung, Beteiligte, Ein- und Ausgangsinformation und notwendige Aktivitäten der Phase in einer Übersichtsdarstellung.

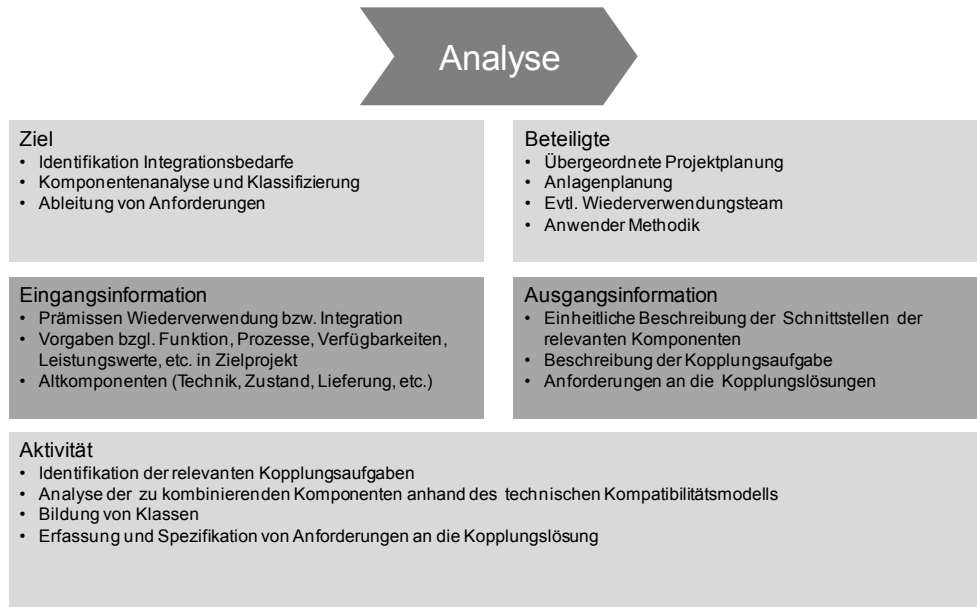


Abbildung 45: Übersicht Analysephase

Die Phase Analyse des entwickelten Vorgehensmodells verfolgt drei Kernziele. Eines ist die Identifikation aller relevanten Integrationsbedarfe im Betrachtungsraum. Dabei wird erfasst, welche Komponenten mit welchen anderen Systemen gekoppelt werden müssen. Des Weiteren sind die Schnittstellen der beteiligten Komponenten zu analysieren und nach Möglichkeit zu klassifizieren. Die Definition von Anforderungen an die zu erarbeitende Kopplungslösung ist ein weiteres Ziel der Analysephase.

An der Phase Analyse sind eine Reihe von Personen bzw. Unternehmenseinheiten beteiligt. Abbildung 46 zeigt eine schematische Darstellung der Rollen und der weitergegebenen Information. Neben dem Anwender der Methodik sind die übergeordnete Projektplanung, die Anlagenplanung und ein eventuell vorhandenes Wiederverwendungsteam in die Phase involviert.

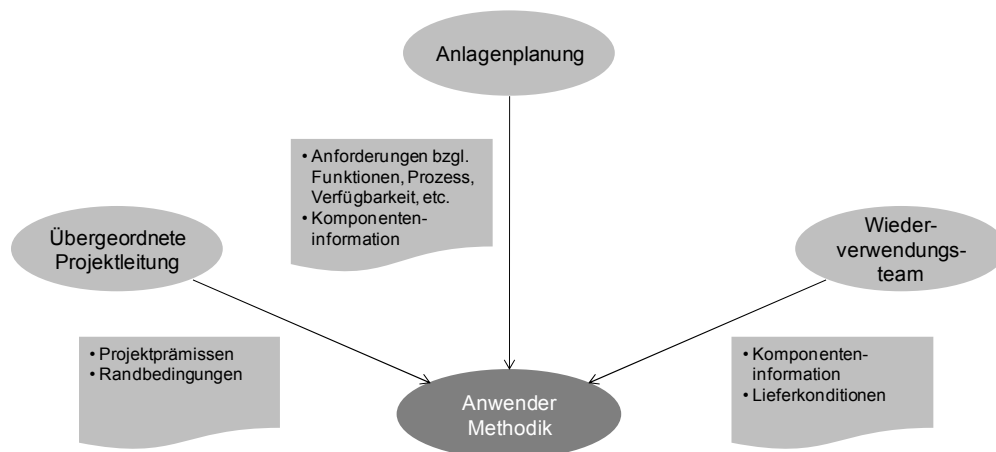


Abbildung 46: Informationsfluss Analysephase

Die einzelnen Partner liefern dabei unterschiedliche Eingangsinformationen. Die Projektleitung definiert Projektprämissen hinsichtlich Wiederverwendung und Integration und legt die Rahmenbedingungen fest. Die Anlagenplanung gibt über Anlagenkonzepte und Layouts vor, welche Integrationslösungen notwendig sind. Konkrete Anforderungen an die Kopplungslösung basieren auf den Vorgaben der Anlagenplanung in Bezug auf Anlagenfunktion, Prozesse und Ausbringung bzw. Verfügbarkeit. Technische Information zu den betreffenden Komponenten werden ebenfalls von der Anlagenplanung zur Verfügung gestellt. Falls die Wiederverwendung von Komponenten durch eine eigenständige Unternehmenseinheit realisiert wird, ist diese ebenfalls Informationslieferant für den Anwender der Methodik. Neben technischer Information zu den Altkomponenten sind die Lieferkonditionen dabei von wesentlicher Bedeutung.

Im Rahmen der Analyse werden anhand von Layouts und Mengengerüsten bzw. Stücklisten die projektspezifischen Integrationsbedarfe identifiziert. Die relevanten Komponentenschnittstellen werden dann entsprechend dem in 5.3 vorgestellten Kompatibilitätsmodell analysiert und die vorhandenen Schnittstellen formal beschrieben. Falls möglich, werden vorhandene Schnittstellenausprägungen klassifiziert und so Komponentengruppen gebildet. Konkrete Anforderungen an die Kopplungslösungen werden von den übergeordneten Anforderungen und Prämissen abgeleitet.

Als Ausgangsinformation bzw. Ergebnis der Analysephase liegt eine konkrete Spezifikation der Kopplungsaufgabe vor. Die Schnittstellen der zu integrierenden

## 5 Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik

---

Komponenten sind beschrieben und die Anforderungen an die Kopplungslösung sind definiert.

### 5.6.2 Phase 2: Entwurf

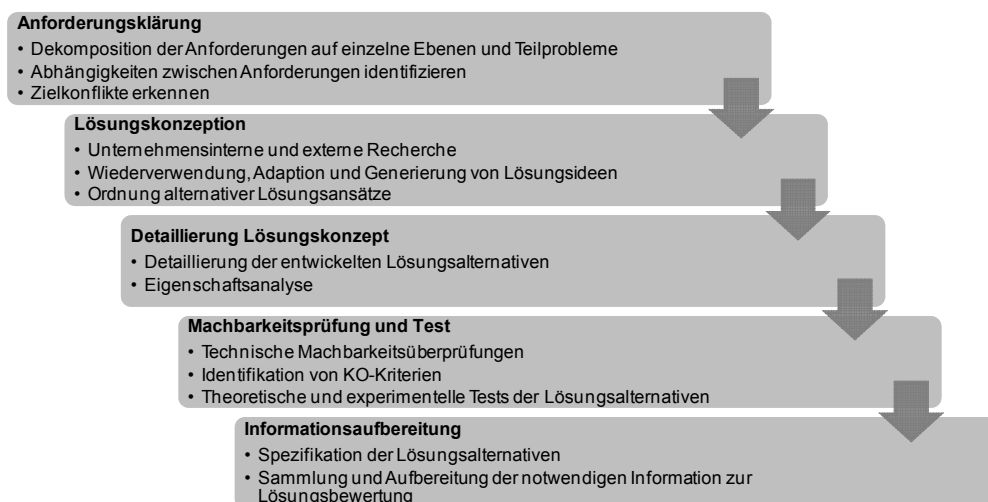
Die zweite Phase des Vorgehensmodells umfasst den Entwurf notwendiger Kopplungslösungen. Die Zielsetzung der Phase ist die Entwicklung anforderungsgerechter Lösungen zur Kopplung von Komponenten. Bereits bestehende Lösungsansätze sollen dabei wiederverwendet werden. Eine Übersicht der Entwurfsphase zeigt Abbildung 47.



Abbildung 47: Übersicht Entwurfsphase

Wesentliche Eingangsinformationen sind die Ergebnisse der Analysephase. Die konkrete Spezifikation der Kopplungsaufgabe und die Anforderungen an die Lösung bilden die Basis für die Entwicklungstätigkeit. Diese umfasst dabei die Schritte Anforderungsklä rung, Lösungskonzeption, Detaillierung des Lösungskonzepts, Machbarkeitsüberprüfung und Informationsaufbereitung (siehe Abbildung 48). Der Teilprozess Anforderungsklä rung stellt dabei eine vorbereitende Tätigkeit der Lösungsentwicklung dar. Ziel ist es dabei, die einzelnen Anforderungen soweit möglich den einzelnen Ebenen des Kompatibilitätsmodells zuzuordnen. Des Weiteren ist es erforderlich, Abhängigkeiten zwischen einzelnen Anforderungen zu identifizieren und für die nachgelagerte Lösungsfindung zu

beschreiben. Im Rahmen der Anforderungsklä rung können Zielkonflikte erkannt werden. Ist eine Gewichtung konkurrierender Teilziele nicht möglich, so ist eine Iteration der vorgelagerten Analysephase notwendig. Die Lösungskonzeption folgt auf die Anforderungsklä rung und dient der Erstellung eines Lösungskonzeptes. Die unternehmensinterne Recherche nach bereits bestehenden Lösungen, die in der in 5.5 beschriebenen Lösungsbibliothek abgelegt sind, und die Analyse am Markt verfügbarer Lösungen ist dabei eine wesentliche Aufgabe. Anforderungsgerechte Lösungen werden dann entweder neu entwickelt oder von bestehenden Lösungen abgeleitet. Falls möglich, ist eine direkte Wiederverwendung existierender Lösungen anzustreben. Die entwickelten Lösungsalternativen werden dann geordnet. Mögliche Ordnungskriterien sind dabei neben technischen Aspekten, der Innovationsgrad oder der notwendige Entwicklungsaufwand.



*Abbildung 48: Teilprozesse der Entwurfsphase*

Auf Basis der in der Konzeptionsphase entwickelten Lösungsideen erfolgt dann eine Detaillierung der Lösungskonzepte. Dies beinhaltet die Konkretisierung und Ausarbeitung der Lösungsidee zu umsetzungsnahen Lösungskonzepten. Die Eigenschaftsanalyse dient hierbei der Vorbereitung der Lösungsbewertung. Im Rahmen von Machbarkeitsuntersuchungen und Tests wird die Umsetzbarkeit der entwickelten Lösungen untersucht. Technische Machbarkeitsuntersuchungen durch theoretische und experimentelle Tests sowie die Identifikation und Überprüfung von KO-Kriterien dienen in dieser Phase dazu, die für eine Entscheidungsfindung notwendige Information zu generieren. Der letzte Teilprozess der Entwurfsphase ist die Informationsaufbereitung, welche im Wesentlichen die

## 5 Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik

---

detaillierte Spezifikation der Lösungsalternativen und die Sammlung und Aufbereitung der für die Bewertung notwendigen Informationen und Daten umfasst.

Als Ergebnis der Phase Entwurf liegen anforderungsgerechte Lösungsalternativen zur aufgabenspezifischen Kopplung von Komponenten und Systemen vor. Die zur Lösungsbewertung und Auswahl notwendigen Informationen und Daten sind vorhanden und können in nachfolgenden Phasen verwendet werden. KO-Kriterien sind identifiziert und die vorliegenden Lösungen entsprechend geprüft.

### 5.6.3 Phase 3: Bewertung

Das Ziel der Phase Bewertung im vierstufigen Vorgehensmodell ist die Evaluation der Lösungsalternativen und die Auswahl der optimalen Lösung. Hierbei sind neben monetären Aspekten auch qualitative Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Abbildung 49 zeigt eine Übersicht der Phase.

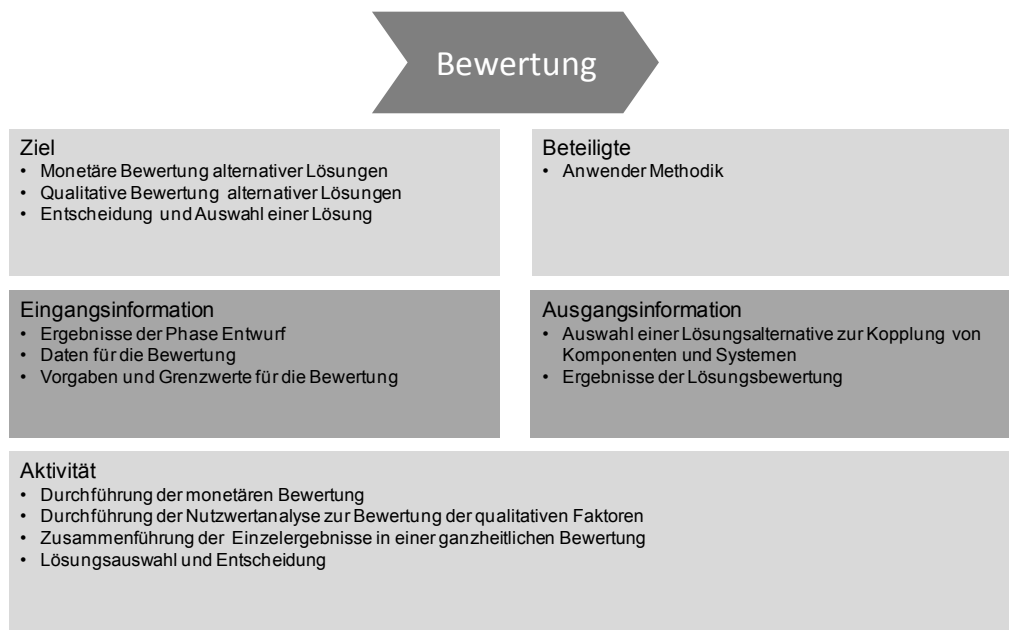


Abbildung 49: Übersicht Bewertungsphase

Eingangsgrößen der Bewertungsphase sind die Ergebnisse der vorgelagerten Phasen Analyse und Entwurf. Die in der Analysephase spezifizierten Anforderungen dienen dabei, zusammen mit den allgemeinen Orientierungsgrößen für die nicht-monetäre Bewertung, als Grundlage für die Festlegung der projektspezifischen Kenngrößen, Kriterien und Gewichtungen bei der monetären und nicht-



monetären Bewertung der Lösungsalternativen mittels des in 5.4 vorgestellten Bewertungsmodells. Dieses bildet die in der Entwurfsphase entwickelten Lösungsalternativen bzw. die entsprechenden Spezifikationen und aufbereiteten Informationen als vergleichbare und transparente Bewertungsergebnisse ab. Dabei werden die monetären Gesichtspunkte und die qualitativen Aspekte der Lösungsbeurteilung getrennt betrachtet und die Teilergebnisse in einer ganzheitlichen Bewertung zusammengeführt. Das so entstehende Portfolio ermöglicht einen einfachen Vergleich der Lösungsalternativen und bildet die Grundlage für die sich anschließende Auswahl der optimalen Lösung. Abbildung 50 zeigt den Informationsfluss schematisch.

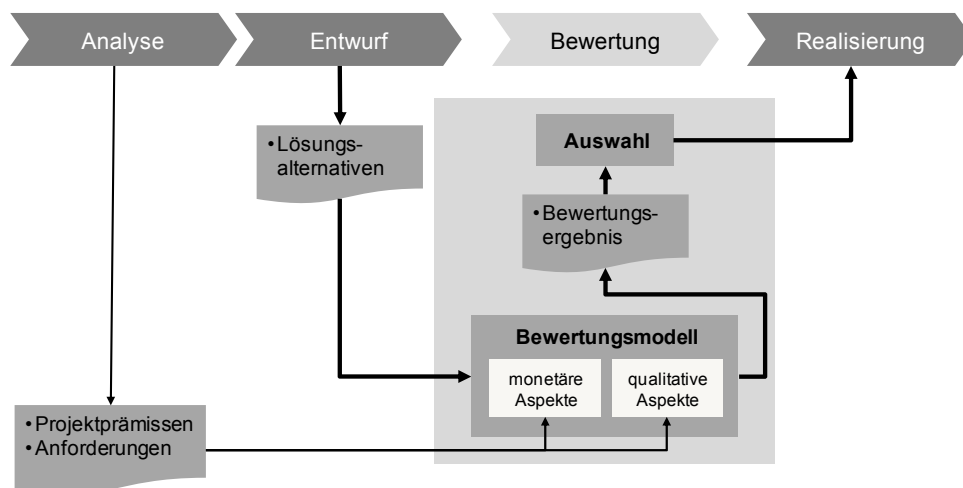


Abbildung 50: Vorgehen Bewertungsphase

Das Resultat der Bewertungsphase sind die Bewertungsergebnisse als vergleichbare Kennzahlen für die einzelnen Lösungsvarianten. Zudem erfolgt die Festlegung auf eine Alternative als Ergebnis des Auswahlprozesses.

#### 5.6.4 Phase 4: Realisierung

Das Ziel der Realisierungsphase ist die Bereitstellung aller notwendigen Informationen, Daten und Dokumente für die Umsetzung der ausgewählten Lösung zur Kopplung von Komponenten und Systemen. Zielsetzung, Ein- und Ausgangsinformation, Beteiligte und Aktivitäten sind in Abbildung 51 dargestellt.

## 5 Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik

---



Abbildung 51: Übersicht Realisierungsphase

Die Ergebnisse der Entwurfsphase, die detaillierten Lösungskonzepte, sind die Haupteingangsinformationen für die Realisierungsphase. Auf Basis dieser Information werden die für die Umsetzung notwendigen Konstruktionsdokumente erstellt bzw. vervollständigt. Neben mechanischen Konstruktionszeichnungen sind dabei vor allem elektrotechnische Stromlaufpläne mit Belegungsplänen von Steckverbindungen und Softwarebausteine von Bedeutung. Bei der finalen Lösungsdetaillierung und Konstruktion sind, soweit technisch möglich, negativ evaluierte Aspekte der Bewertungsphase zu optimieren. Auf Basis der Konstruktionsunterlagen wird die Kopplungslösung final im Rahmen von Labor- und Serientests geprüft und freigegeben. Zusätzlich zu den Konstruktionsunterlagen sind in der Realisierungsphase weitere Dokumente für die Umsetzung der Lösung in einem Fahrzeugprojekt zu erstellen. Die technische Spezifikation, Bausteinbibliotheken für Steuerungssysteme und Regeln bzw. Vorlagen für die konstruktive Ausführung sind dabei von besonderer Wichtigkeit und bilden die Grundlage für die Ausschreibung und den Einkauf der Leistungen im konkreten Fahrzeugprojekt. Zudem ist in der Realisierungsphase die Beschaffung eventuell notwendiger Bauteile zu klären. Dabei sind geeignete Lieferanten auszuwählen und Lieferbedingungen sowie Preise in Verhandlungen zu fixieren. Die entsprechenden Konditionen werden in Kaufteillisten festgeschrieben. Abbildung 52 zeigt die Ergebnisdokumente der Realisierungsphase.

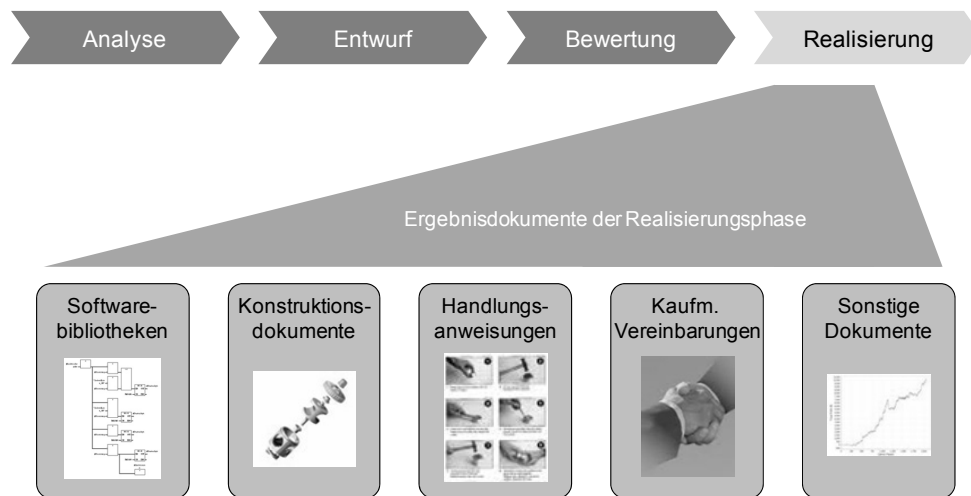


Abbildung 52: Ergebnisse der Realisierungsphase

Ergebnisse der Realisierungsphase sind neben den für Beschaffungsprozesse wichtigen Ausschreibungsunterlagen und Kaufteillisten die Dokumente zur Beschreibung der technischen Lösung. Diese Spezifikationen, Konstruktionsregeln und -vorlagen sowie die entwickelten Steuerungsbausteine und Handlungsanweisungen für komplexe technische Vorgänge bei Montage und Inbetriebnahme bilden die Grundlage für die funktionssichere Umsetzung der Kopplungslösung im Fahrzeugprojekt durch interne und externe Partner.

## 5.7 Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle

Nach der Vorstellung der Methodik in den vorangegangenen Kapiteln erfolgt in diesem Abschnitt die Diskussion der Übertragbarkeit auf Aufgabenstellungen außerhalb des Einsatzbereichs automobiler Karosseriebau, der mit seinen spezifischen Charakteristika und Anforderungen die Basis für die Entwicklung bildete. Betrachtet werden hierzu die grundlegenden Eigenschaften des automobilen Karosseriebaus, die für den Einsatz der Methodik relevant sind.

Ein Hauptattribut des Karosseriebaus ist der hohe *Automatisierungsgrad*. Dieser erfordert durch eine unzureichende Wandlungsfähigkeit der eingesetzten Technik die methodische Unterstützung von Rekonfigurationsprozessen. Um durch den Einsatz der entworfenen Methodik Vorteile erzielen zu können, ist aber keine definierte Höhe des Automatisierungsgrades notwendig. Hybride und nur in singulären Stationen automatisierte Produktionsszenarien profitieren ebenso von der

strukturierten Entwicklung von Integrationslösungen wie hochautomatisierte Gewerke.

Der *modulare Aufbau* der Produktionsanlagen und Fertigungszellen aus Basiselementen wie Industrieroboter, Bauteilfixierungen, Antriebe oder Prozessapplikationen, die jeweils über Schnittstellen im Anlagenverbund interagieren, ist ein weiteres Merkmal des Karosseriebaus. Dies ist eine Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit der Methodik. Nur in Systemen, die aus eigenständigen Modulen bestehen, die im Falle einer Rekonfiguration rekombiniert werden, ist der Einsatz der Methodik sinnvoll. Vollständig gekapselte Einmaschinensysteme, die keine modulare Struktur aufweisen, stehen nicht im Fokus der Methodik. Die Konsequenz hieraus ist eine Einschränkung der Übertragbarkeit. Dennoch ist der Raum der möglichen industriellen Anwendungsfälle nur marginal reduziert, da automatisierte Betriebsmittel heute weitgehend modular aufgebaut sind. So sind beispielsweise in der spanenden Fertigung die Bearbeitungsmaschinen an sich zwar als abgeschlossene Einheiten ausgeführt, die Systeme für den Materialtransport oder die Qualitätssicherung besitzen aber eine modulare Struktur aus Basiselementen. Die Einrichtungen der automatisierten Montagetechnik, zu denen auch die Anlagen des Karosseriebaus gezählt werden können, weisen nahezu vollständig einen modularen Aufbau auf.

Eine charakteristische Eigenschaft der Anlagentechnik des automobilen Karosseriebaus ist die spezifische *Steuerungsarchitektur*, die durch eine zentrale Steuerung und eine dezentrale Regelung bzw. Bahnsteuerung gekennzeichnet ist. Die Steuerungsarchitektur beeinflusst wesentlich den Informationsfluss zwischen einzelnen Modulen der Anlagentechnik und tangiert daher in erster Linie das Kompatibilitätsmodell der Methodik. Dieses besitzt einen explizit universellen Charakter und ist nicht auf eine spezifische Architektur eingeschränkt, was einen Transfer auf andere Steuerungsarchitekturen ermöglicht. Zudem erlaubt eine Anpassung des Kompatibilitätsmodells an neuartige Architekturen eine Adaption der Methodik an zukünftige Anforderungen.

Neben der Steuerungsarchitektur ist die Relevanz der *eingesetzten Technik* für die Übertragbarkeit der Methodik zu diskutieren. Im Karosseriebau dominieren aktuell SPS-Systeme als zentrale Steuereinrichtungen in Fertigungszellen, die über Feldbussysteme weitere intelligente, mechatronische Komponenten koordinieren. Ähnlich wie bereits der Aspekt Architektur betrifft die eingesetzte Technik vorrangig das Kompatibilitätsmodell als Kernbestandteil der Methodik. Hierbei gilt, dass dieses als Beschreibungsmodell generische Funktionalitäten spezifi-

---

ziert und nicht an bestimmte Technologien gebunden ist. Folglich ist die konkrete technische Ausprägung der Zellensteuerung für eine Anwendbarkeit der Methodik nicht ausschlaggebend und stellt somit keine Einschränkung für deren Übertragbarkeit dar.

Eine weitere Besonderheit des automobilen Karosseriebaus ist der hohe projektspezifische *Standardisierungsgrad* der Anlagentechnik. Dieser ist jedoch keine Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit der Methodik, da das verbesserte Aufwand-Nutzen-Verhältnis der Lösungsentwicklung unabhängig von der Einsatzhäufigkeit und damit vom Standardisierungsgrad ist. Dennoch ist ein hoher Standardisierungsgrad vorteilhaft, da so eine gesteigerte Hebelwirkung in Bezug auf die Erstellung einer wirtschaftlich optimaleren Kopplungslösung durch die häufigere Nutzung erzielt werden kann.

Als letzter Aspekt bezüglich der Frage der Übertragbarkeit der Methodik auf andere Anwendungsfälle wird die typische Ausprägung des *Planungsprozesses* im automobilen Karosseriebau betrachtet. Dieser ist durch eine hohe Anzahl von beteiligten Stellen, eine umfassende Unterstützung durch verschiedene Methoden und Softwarewerkzeuge und eine klare Strukturierung mit definierten Phasen und Aktivitäten gekennzeichnet. Aufgrund der Tatsache, dass die entwickelte Methodik bestehende Planungsprozesse nur um die Entwicklung von Kopplungslösungen ergänzt und mit diesen in erster Linie durch die Integration übergeordneter Anforderungen verknüpft ist, ist eine Adaption an veränderte Planungsprozesse einfach möglich.

Zusammenfassend lässt sich aus der Einzelbetrachtung der Charakteristika des automobilen Karosseriebaus und deren Diskussion hinsichtlich einer möglichen Einschränkung des Einsatzfeldes folgender Schluss betreffend der Übertragbarkeit der Methodik ziehen:

Grundsätzlich ist die Methodik für eine Nutzung im Kontext des automobilen Karosseriebaus konzipiert und erzielt in diesem Umfeld eine maximale Wirksamkeit. Vorgehensweisen und Modelle sind explizit für den der Entwicklung zugrundeliegenden Anwendungsfall und dessen technische Randbedingungen ausgelegt. Dennoch ist eine Übertragbarkeit auf andere Einsatzszenarien gegeben. Von entscheidender Bedeutung hierfür ist die Universalität und Erweiterbarkeit des Kompatibilitätsmodells, welches eine Modellierung unterschiedlicher Steuerungsarchitekturen sowie verschiedenartiger technischer Umsetzungen erlaubt. Des Weiteren ist das entwickelte Vorgehensmodell nur über definierte

## 5 Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik

---

Eingangsgrößen mit den spezifischen Planungsprozessen der Automobilindustrie verknüpft und eigenständig auch unter veränderten Rahmenbedingungen nutzbar. Ebenso ist ein hoher Standardisierungsgrad, wie er für den Karosseriebau typisch ist, nicht notwendig für einen wirtschaftlichen Vorteil durch die Anwendung der Methodik.

Aus den vorgestellten Aspekten resultiert, dass die Übertragbarkeit der entwickelten Methodik für die Rekombination von Anlagen auf Anwendungsfälle außerhalb des automobilen Karosseriebaus gegeben ist. Sinnvoll und möglich ist ein Einsatz in allen Produktionsszenarien, die einen relevanten Anteil automatisierter und modular aufgebauter Betriebsmittel aufweisen und Wandlungsprozessen unterzogen werden. Hybride Montagestrukturen mit automatisierten Einzelstationen oder spanende Fertigungssysteme mit automatisiertem Materialtransport können als typische Beispiele hierfür angeführt werden.

---

## **6 Anwendungsbeispiel**

### **6.1 Allgemeines**

Im sechsten Abschnitt dieser Arbeit wird die exemplarische Umsetzung der entwickelten Methodik in einem industriellen Anwendungsfall vorgestellt. Hierzu wurden die vier Phasen des Vorgehensmodells abgearbeitet und die jeweiligen Aktivitäten durchgeführt. Neben einer Analyse der Schnittstellen mit Hilfe des technischen Kompatibilitätsmodells erfolgten der Lösungsentwurf und die Bewertung. Wie in der Realisierungsphase vorgesehen, schloss die Bereitstellung der notwendigen Daten und Dokumente das Anwendungsbeispiel ab.

### **6.2 Industrieller Anwendungsfall: Wiederverwendung Industrieroboter**

Der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Anwendungsfall ist in ein Industrie-projekt eingebettet, dessen Ziel eine Reduzierung der modellspezifischen Investitionskosten durch die Nutzung bereits im Unternehmen vorhandener und nicht mehr benötigter Anlagentechnik für die Erstellung neuer Produktionsanlagen war. Fokussiert wurde innerhalb des übergeordneten Projektes die Integration von Industrierobotern in neu aufgebaute Produktionsanlagen.

Die Roboter stammen dabei aus Anlagen, die nach den Richtlinien des Standards für Anlagentechnik der Modellreihe 1 (M1) realisiert wurden. Dieser Standard wurde im Unternehmen zwischen 2002 und 2004 erarbeitet und definiert die Anlagentechnik für eine Familie von Fahrzeugmodellen.

Gemeinsam mit dem Roboter bleiben seine Steuerung, seine Versorgung sowie die Roboterapplikation und dessen Steuerung erhalten und müssen in das Konzept der neuen Anlage integriert werden.

Dabei stellt die Einbindung der Prozesstechnik in die Anlage eine separat zu betrachtende Integrationsaufgabe dar. Aufgrund der Vielzahl möglicher Roboterprozesse und der methodischen Redundanz bei der Betrachtung, liegt der Fokus des Anwendungsfalls auf der Anbindung des Roboters unter Vernachlässigung der Prozesstechnik. An den betreffenden Stellen wird dennoch auf Wechselwirkungen zwischen Roboter und Prozesstechnik verwiesen.

Die neu zu erstellenden Anlagen sind entsprechend der steuerungstechnischen Konzepte des Standards der Modellreihe 2 (M2) aufgebaut, welcher erstmalig im Jahr 2009 eingesetzt wurde.

### 6.3 Analysephase

Im Folgenden werden die Aktivitäten und Ergebnisse der Analysephase des Vorgehensmodells vorgestellt. In einem ersten Schritt werden die Vorgehensweise und die verwendeten Daten und Dokumente erläutert. Anschließend wird die Spezifikation der Schnittstellen von Industrieroboter und Zellensteuerung mit Hilfe des Modells für Kompatibilität präsentiert und die Kopplungsaufgabe spezifiziert. Die Ableitung der Bewertungskriterien auf Basis der projektspezifischen Rahmenbedingungen bildet den Abschluss des Kapitels.

#### 6.3.1 Vorgehensweise

Für die Analyse der zu koppelnden Systeme stehen unterschiedliche Informationsquellen zur Verfügung. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des Detaillierungsgrades und betrachten häufig nur spezifische Merkmale der beteiligten Fachdisziplinen Mechanik, Elektrotechnik und Steuerungssoftware.

Ein wesentliches Dokument für die Analyse sind sogenannte Konzeptbilder der Standardunterlagen, die die Schnittstellen zwischen Systemen vollständig aber nur in geringer Detaillierung wiedergeben. Während die Konzeptbilder einen Überblick über die eingebundenen Komponenten geben, beinhalten Schaltpläne oder die Softwaredokumentation detaillierte spezifische Informationen zu den Verbindungen und Kommunikationsschnittstellen.

Zur Festlegung einer sinnvollen Abgrenzung des Roboters von der Anlage ist die schematische und übersichtliche Darstellung des Konzeptbildes ausreichend. Erst zur exakten Beschreibung der Schnittstellen ist es notwendig, die detaillierteren Dokumente der Fachdisziplinen auszuwerten. Die Systemgrenze wird so gelegt, dass die Prozesstechnik des Roboters, in Abbildung 53 dargestellt eine Schweißanwendung, innerhalb der Systemgrenze liegt. Dieses Vorgehen ist im Anwendungsbeispiel legitim, da eine Wiederverwendung von Roboter inklusive Prozesstechnik angestrebt wird. Somit ist die Kommunikation zwischen dem Roboter und seiner Prozesstechnik sowie deren Medien- und Energieversorgung nicht Teil der Schnittstellenbetrachtung.



---

Wird der Roboter im Konzeptbild freigeschnitten so zeigt sich, dass die Kommunikationsschnittstellen zwischen dem Roboter und der Anlagensteuerung über die Systemgrenze hinweg gehen und somit durch die Schnittstellenbeschreibung spezifiziert werden müssen (vgl. Abbildung 53). Die grundlegenden Kommunikationswege können so erschlossen werden und bilden den Ausgangspunkt für die Auswertung der elektrischen und mechanischen Konstruktionsdokumente sowie der Steuerungssoftware und deren Dokumentation.

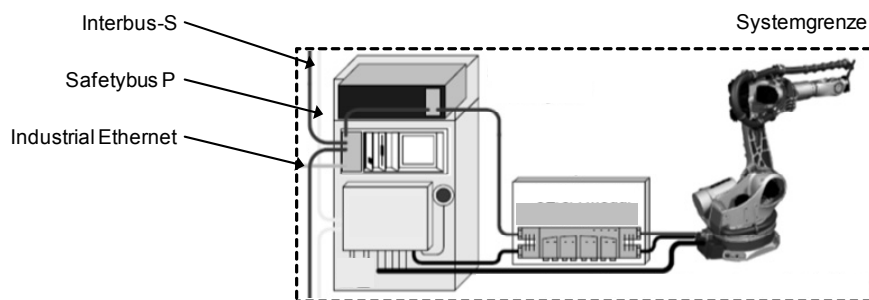


Abbildung 53: Freischnitt Konzeptbild

### 6.3.2 Schnittstellen Industrieroboter

Die Analyse und Beschreibung der Schnittstellen des Industrieroboters erfolgt entsprechend des in Abschnitt 5.3 dieser Arbeit vorgestellten Modells. Dabei wird die Spezifikation in den Ebenen physikalische Anbindung, Datenübertragung, Treiber und Applikation erstellt.

#### Physikalische Anbindung

Die Modellebene Physikalische Anbindung spezifiziert die Kabeltypen und Steckertechnik, die die physische Verbindung zwischen einzelnen Komponenten darstellen. Die relevanten Verbindungen bei der untersuchten Komponente Industrieroboter weisen dabei folgende Ausprägungen auf.

Beim Interbus-S erfolgt die Datenübertragung über einen Lichtwellenleiter (LWL), der als 2MBit-Polymerfaser ausgeführt ist. Der Lichtwellenleiter ist direkt an der Karte mit einem FSMA-LWL-Stecker (Field Installable Subminiature Assembly) angebunden. Der Vorteil von Lichtwellenleitern gegenüber Kupferdrähten liegt in der Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen.

Beim Safetybus P wird auf die Verwendung eines klassischen Steckers verzichtet. Das Kabel wird durch einen Durchführungsstecker in den Schaltschrank geführt und dort direkt verdrahtet. Damit spart man nicht nur die Kosten der Steckverbindung, sondern beseitigt mit dem Stecker eine mögliche Quelle für Kontaktprobleme. Als Kabel wird ein geschirmtes Kupferkabel verwendet.

Der Anschluss des Industrial Ethernet erfolgt ebenfalls direkt an der Karte. Das Kabel wird mittels eines Durchführungssteckers in den Schaltschrank eingebracht. Das Leitungskabel ist in Kupfer ausgeführt.

### **Datenübertragung**

Die Ebene Datenübertragung legt fest, welche Feldbusprotokolle für die Kommunikation einer Komponente verwendet werden. Da die eingesetzten Bussysteme industrielle Standardanwendungen sind, wird auf eine detaillierte technische Beschreibung an dieser Stelle verzichtet.

Die Kommunikation des untersuchten Industrieroboters erfolgt über drei parallele Feldbusverbindungen, die unterschiedliche Daten übertragen. Eine Interbus-S Verbindung dient dem Transfer der Steuersignale zwischen Zellensteuerung und Roboter. Sicherheitsrelevante Signale, wie etwa Alarmmeldungen, Notaus oder Schutztürüberwachungen, werden mittels Safetybus P übermittelt. Die Anbindung an die Peripherie, wie Visualisierungs- und Bedienelemente oder die Prozessdatenarchivierung, erfolgt über eine Industrial Ethernet Verbindung.

### **Treiber**

Der Treiberbaustein ist dafür verantwortlich, die elektrisch oder optisch übertragenen Signale den entsprechenden Variablen zuzuweisen und Basisfunktionen für die Ansteuerung der Komponente bereitzustellen.

Der Interbus-S verfügt über eine Datenbreite von je 6 Worten Ein- und Ausgangsdaten auf dem Prozessdatenkanal. Darüber hinaus können 4 Worte über den Peripherals Communication Protocol (PCP)-Kanal ausgetauscht werden.

Die Bitbelegung der Ein- und Ausgangsdaten ist dabei in drei Abschnitte unterteilt. Die ersten beiden Worte sind den Systembits vorbehalten. Mit diesen Bits wird der Roboter gesteuert. Das heißt, dass er hierüber Fahrbefehle und Fahrfreigaben erhält, aber auch das Ende eines Jobs quittiert oder Fehler signalisiert. Die Worte 3 und 4 sind zur Steuerung der Roboterapplikation vorgesehen, beispielsweise eines Schweißgerätes. Aufgrund der großen Anzahl möglicher Roboterap-

---

pplikationen soll im Rahmen dieser Arbeit auf die Detailbeschreibung der Applikationsdaten verzichtet werden. Schließlich bleiben die Datenworte 5 und 6, die dem Anwender frei zur Verfügung stehen, um weitere Befehle, Sensordaten oder Zustandmeldungen mit dem Roboter auszutauschen. Abbildung 54 zeigt die Bitbelegung der Eingangsdaten des Roboters nach dem M1-Standard.

## 6 Anwendungsbeispiel

Roboter IN	Variablenname Roboter	Beschreibung	SPS OUT		
1	\$CONF_MESS	Fehler Quittierung	488.0	Byte 1	Wort 1
2	\$EXT_START	Start Automatik Extern	488.1		
3	PGNO_VALID	Programmnummer gültig	488.2		
4	PGNO_PARITY	Programmnummer Parität	488.3		
5	PGNO_BIT1	ext. Prog. Nr. Bit1	488.4		
6	PGNO_BIT2	ext. Prog. Nr. Bit2	488.5		
7	PGNO_BIT3	ext. Prog. Nr. Bit3	488.6		
8	PGNO_BIT4	ext. Prog. Nr. Bit4	488.7		
9		Reserve	489.0	Byte 2	Wort 1
10		Reserve	489.1		
11	\$DRVES_ON	Antriebe Ein	489.2		
12		Reserve	489.3		
13		Reserve	489.4		
14	\$MOVE_ENABLE	Fahrfreigabe	489.5		
15	E_NO_APPLICATION	Ohne Applikation	489.6	Byte 3	Wort 2
16	E_NO_PART	Bauteillose Inbetriebnahme	489.7		
17	ES_KOLL	Kollisionsbereich Bit1	490.0		
18	ES_KOLL	Kollisionsbereich Bit2	490.1		
19	ES_KOLL	Kollisionsbereich Bit3	490.2		
20	ES_KOLL	Kollisionsbereich Bit4	490.3		
21	ES_KOLL	Kollisionsbereich Bit5	490.4		
22	ES_KOLL	Kollisionsbereich Bit6	490.5		
23	E_KOLL_FREI	Kollisionsbereich ist frei	490.6		
24	E_KOLL_FRG	Freigabe erkannt	490.7		
25 ...	Reserve		491.0	Byte 4	Wort 2
32			...		
33 ...	Wort 3 und 4		492.0	Byte 5	Wort 3
40			...		
41 ...	reserviert		493.0	Byte 6	Wort 3
48			...		
49 ...	für		494.0	Byte 7	Wort 4
56			...		
57 ...	Applikation		495.0	Byte 8	Wort 4
64			...		
65 ...	Wort 5 und 6		496.0	Byte 9	Wort 5
72			...		
73 ...	frei		497.0	Byte 10	Wort 5
80			...		
81 ...	für		498.0	Byte 11	Wort 6
88			...		
89 ...	Anwender		499.0	Byte 12	Wort 6
96			...		

Abbildung 54: Bitbelegung der Eingangsdaten des Roboters

---

## Applikation

Die informationstechnische und funktionale Einbindung einer Komponente wird in der Applikationsebene spezifiziert. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Schrittkettenprogrammierung, die den Produktionsablauf steuert und die einzelnen Teilsysteme einer Anlagenzelle koordiniert. Die Ansteuerung des Roboters ist dabei folgendermaßen ausgeführt:

Zunächst wird der Aufruf eines Schrittkettenbausteins untersucht. In der Softwaredokumentation des Roboters ist erläutert, dass der OB1 (Organisationsbaustein OB), der zyklisch abgearbeitete Hauptprogrammteil der SPS, je nach gewünschtem Betriebsartenbereich x den Funktionsbaustein FC x00 aufruft. Dieser wiederum ruft unter anderem den zum Betriebsartenbereich zugehörigen Funktionsbaustein FC x50 auf. Die Schrittkette selbst ist in den Schrittkettenbausteinen FB 16xx implementiert, welche nach Bedarf von den Schrittkettenbausteinen angewählt werden. Es sind maximal 32 Schrittketten zulässig. Die einzelnen Schrittketten beschreiben den detaillierten Ablauf des Prozesses. Dabei wird die Anlage nach einem gewissen Teilprozess jeweils in einen definierten und nachprüfbareren Zustand, eine Grundstellung, gebracht. Dort überprüft die Prozessüberwachung die korrekte Ausführung des vorherigen Schrittes, bevor sie die weitere Verarbeitung im nächsten Schritt freigibt. Für jede Grundstellung muss gelten, dass die Anlage aus dieser Position heraus angefahren werden kann. Pro Schrittkette sind maximal vier Grundstellungen erlaubt. Kommt es während des Ablaufs der Schrittkette zu Störungen, werden diese über den Funktionsbaustein ALARM\_SQ an das übergeordnete Visualisierungssystem gemeldet. Die Verriegelungsüberwachung (Interlock), eine interne Funktionalität von Speicherprogrammierbaren Steuerungen des Herstellers Siemens, darf nicht verwendet werden. Die Ansteuerung von Stellgeräten aus der Schrittkette heraus geschieht durch das Setzen bestimmter Bits im Datenbaustein DB 60.

In der nachfolgenden Tabelle (siehe Tabelle 6) sind die Ein- und Ausgangsdaten des Schrittkettenbausteins FB 16xx dargestellt. Über diese Daten wird der Baustein gestartet und während des Programmablaufs überwacht.

Tabelle 6: Ein- und Ausgangsparameter Schrittkettenbaustein Roboter

Parameter	Variablentyp	Beschreibung
INIT_SQ	BOOLEAN	Zurücksetzen der Schrittkette (Reset – Funktion); mit Grundstellung der Schrittkette verbinden
ACK_EF	BOOLEAN	Keine Beschaltung
HALT_TM	BOOLEAN	Stoppen der Schrittüberwachungszeit
DISP_SALL	BOOLEAN	Keine Beschaltung
S_PREV	BOOLEAN	Rückwärtsblättern durch die derzeit aktiven Simultanschritte; wird für die Visualisierung benötigt
SW_AUTO	BOOLEAN	Betriebsart Automatik
SW_MAN	BOOLEAN	Betriebsart Hand
S_NO	WORD	Anzeige der Schrittnummer
S_MORE	BOOLEAN	Anzeige weiterer aktiver Simultanschritte
ERR_FLT	BOOLEAN	Anzeige eines Schrittkettenfehlers
TM_HALTED	BOOLEAN	Anzeige, ob Schrittüberwachungszeit gestoppt ist; wird mit dem Eingangsparameter HALT_TM verschaltet
EN / ENO	BOOLEAN	Keine Beschaltung

### 6.3.3 Schnittstellen Zellensteuerung

Wie bereits die Analyse des Industrieroboters, erfolgt auch die Untersuchung der Zellensteuerung mit Hilfe des Ebenenmodells. Konkret wurde die Schnittstelle zwischen Anlagensteuerung und Industrieroboter in der Ausprägung des Anlagentechnikstandards M2 untersucht.

#### Physikalische Verbindung

Aus der Schnittstellendefinition geht hervor, dass die Kommunikation im M2-Standard ausschließlich über Profinet I/O vollzogen wird. Als Übertragungsmedium wird auf ein geschirmtes Kupferkabel zurückgegriffen. Die Kupferkabel sind einheitlich in der Klassifikation American Wire Gauge (AWG) 22 ausgeführt, der eingesetzte Steckertyp ist RJ45. Im Schaltschrank kann der Anschluss mit einem klassischen RJ45-Stecker realisiert werden. Im IP67-Bereich außerhalb des Schaltschranks sind die Verbindungen mit einem RJ45-IP67-Push-Pull-Stecker realisiert. Dies ist ein Stecker mit RJ45-Ethernet-Anschluss, dessen Gehäuse speziell auf die Bedürfnisse der automobilen Fertigung abgestimmt ist. Er

---

entstand in Kooperation mit der Automatisierungsinitiative Deutscher Automobilhersteller (AIDA) und wird deshalb häufig als AIDA-Stecker bezeichnet.

### **Datenübertragung**

Die Datenübertragung erfolgt über das Busprotokoll Profinet. Dieses ist durch die Profinet Nutzer Organisation (PNO) standardisiert und ermöglicht in seiner aktuellen Spezifikation neben der Übertragung von Steuerinformation die sichere Übertragung von Signalen, die Relevanz für die Personensicherheit besitzen.

### **Treiberbaustein**

Auf Ebene des Treiberbausteins stellt sich die Schnittstelle der Zellensteuerung wie folgt dar: Die Kommunikationsbreite zwischen der SPS und dem Roboter beträgt 75 Worte (150 Bytes). Dabei entfallen 64 Byte auf die direkte Kommunikation zwischen Roboter und SPS, 32 Byte auf Transfermodule je nach Roboterapplikation und 50 Byte auf Transfermodule zur Rangierung der Bauteilkontrolle und Stellgeräte in die SPS. Auch beim M2-Standard existiert eine Zuordnungsliste der einzelnen Bitadressen zu den Prozessgrößen und Variablen. Man erkennt, dass die Datenbereiche nach der Funktionalität der Kommunikation geordnet sind. Beispielsweise existieren ein zusammenhängender Datenbereich, der die Systembits des Roboters enthält und ein Datenbereich, in dem die Kommunikation mit der Punktschweißapplikation stattfindet. In der folgenden Übersicht ist die Ausgangsbitbelegung der Zellensteuerung bzw. die Eingangsbitbelegung des Roboters dargestellt, das heißt derjenige Datenbereich, in dem die Systembits des Roboters übertragen werden (Abbildung 55).

## 6 Anwendungsbeispiel

lfd. Nr.	Variablenname	Beschreibung	Roboteradresse	
			Bit	Byte
176	SYS_di_MotorOn	Antriebe Ein	0	22
177	SYS_di_ErrReset	Fehler Quittierung	1	
178	SYS_di_Start	Programm Start	2	
179	SYS_di_Stop	Programm Stop	3	
180	SYS_di_EStopReset	Quittierung Roboter-Not-Aus	4	
181			5	
182	*Reserviert	für Anwendung in Montage	6	
183			7	
184	SYS_gi_ProgNumber	Programmnummer Bit 0	0	23
185	SYS_gi_ProgNumber	Programmnummer Bit 1	1	
186	SYS_gi_ProgNumber	Programmnummer Bit 2	2	
187	SYS_gi_ProgNumber	Programmnummer Bit 3	3	
188	SYS_gi_ProgNumber	Programmnummer Bit 4	4	
189	SYS_gi_ProgNumber	Programmnummer Bit 5	5	
190	SYS_di_ProgNumValid	Programmnummer gültig	6	
191	PLC_di_StartBackup	Backup anstarten von SPS	7	24
192	PLC_di_CollZone	Kollisionsschutznummer Bit 0	0	
193	PLC_di_CollZone	Kollisionsschutznummer Bit 1	1	
194	PLC_di_CollZone	Kollisionsschutznummer Bit 2	2	
195	PLC_di_CollZone	Kollisionsschutznummer Bit 3	3	
196	PLC_di_CollZone	Kollisionsschutznummer Bit 4	4	
197	PLC_di_CollZone	Kollisionsschutznummer Bit 5	5	
198	PLC_di_CollZoneFree	Kollisionsschutz Freigabe	6	25
199	PLC_di_CollZoneRef	Kollisionsschutz Referenzierung	7	
200	PLC_di_Home_1	SPS für Home 1	0	
201	PLC_di_Home_2	SPS für Home 2	1	
202	PLC_di_Home_3	SPS für Home 3	2	
203	PLC_di_Home_4	SPS für Home 4	3	
204	PLC_di_Home_5	SPS für Home 5	4	
205	PLC_di_ServicePosAck	Freigabe zum Verlassen der Wartungsposition	5	26
206	PLC_di_NoPart	Ablauf ohne Bauteil	6	
207	PLC_di_ProgSkip	Abbruch Ablauf	7	
208	PLC_di_NoApplication	ohne Applikation	0	
209	PLC_di_SyncReq	Referenzfahrt angefordert	1	
210	PLC_di_BrakeTestReq	Bremsentest angefordert	2	
211			3	
212			4	
213			5	
214			6	
215			7	

Abbildung 55: Bitbelegung der Ausgangsdaten der Zellensteuerung

### Applikation

In der Applikationsebene wird die logische Datenverarbeitung in den Schrittketten analysiert.

Zunächst wird die Einbindung eines Schrittkettenbausteins in seine Programmumgebung beschrieben. Hier ist eine Besonderheit, dass die Software in einzelne komponentenbezogene Einheiten strukturiert ist. Zu jeder Komponente xx gehört ein Funktionsbaustein FB 1xx mit dem zugehörigen Datenbaustein DB 1xx. Innerhalb jeder Komponente ruft der FB 1xx den Schrittkettenbaustein FB 4yy auf, wobei yy für die Nummer der Schrittkette steht. Es sind maximal 99 Schrittketten in einer Steuerung zugelassen. Pro Schrittkette sind bis zu 32 Grundstellungen



möglich. Eine Grundstellung steht hierbei für einen definierten Zustand der Anlage, von der aus die Anlage gestartet werden kann. Die Versorgung der Schrittkette erfolgt ausschließlich über Parameter aus Variablen des Typs (User Defined Type) UDT 21 und UDT 29. Bei Fehlern während der Abarbeitung der Schrittkette werden diese über ALARM\_SQ an die Visualisierung übertragen. Die Verriegelungsüberwachung (Interlock) darf nicht verwendet werden.

Die Ansteuerung von Stellgeräten aus der Schrittkette heraus wird über den DB 62 durchgeführt und nicht über Merker. Generell gibt es bei der Applikationsbeschreibung des M2-Standards keine Standardmerkerbereiche. Die Variablenbelegung des Schrittkettenbausteins FB 4yy ist in Tabelle 7 aufgeführt.

*Tabelle 7: Ein- und Ausgangsparameter Schrittkettenbaustein Zellensteuerung*

Parameter	Variablentyp	Beschreibung
INIT_SQ	BOOLEAN	Zurücksetzen der Schrittkette (Reset – Funktion); mit Grundstellung der Schrittkette verbinden
ACK_EF	BOOLEAN	Keine Beschaltung
HALT_TM	BOOLEAN	Stoppen der Schrittüberwachungszeit
ZERO_OP	BOOLEAN	Alle mit N,L,D zugewiesenen Operanden zurücksetzen
DISP_SALL	BOOLEAN	Alle Schritte anzeigen
S_PREV	BOOLEAN	Rückwärtsblättern durch die derzeit aktiven Simultanschritte; wird für die Visualisierung benötigt
SW_AUTO	BOOLEAN	Betriebsart Automatik
SW_MAN	BOOLEAN	Betriebsart Hand
S_NO	WORD	Anzeige der Schrittnummer
S_MORE	BOOLEAN	Anzeige weiterer aktiver Simultanschritte
ERR_FLT	BOOLEAN	Anzeige eines Schrittkettenfehlers;
TM_HALTED	BOOLEAN	Anzeige, ob Schrittüberwachungszeit gestoppt ist; wird mit dem Eingangsparameter HALT_TM verschaltet
OP_ZEROED	BOOLEAN	Operanden zurückgesetzt
EN / ENO	BOOLEAN	Keine Beschaltung

### 6.3.4 Spezifikation der Kopplungsaufgabe

Im Anschluss an die Analyse der einzelnen Komponentenschnittstellen erfolgt die Beschreibung der Kopplungsaufgabe durch den ebenenspezifischen Abgleich der Kommunikationspartner.

Das deutlichste Unterscheidungsmerkmal in Bezug auf die physikalische Anbindung ist die Anzahl der Leitungen, die bei den untersuchten Komponenten eingesetzt werden. Während der M1-Roboter drei Leitungen (Interbus, Safetybus P, Industrial Ethernet) benötigt, wird in M2-Anlagen die Kommunikation über ein einziges Leitungsmedium abgewickelt. Der M1-Roboter setzt sowohl Lichtwellenleiter als auch Kupferverbindungen ein, wohingegen das Profinet der M2-Anlagen über ein Kupferkabel betrieben wird. Diese Unterschiede setzen sich auch in der Steckertechnik fort. Während beim M1-Roboter soweit möglich auf Direktverkabelung gesetzt wurde, wird in den M2-Anlagen der speziell entwickelte AIDA-Stecker benutzt.

Ebenso wie in der physikalischen Ebene stellt der Übergang von drei Bussystemen auf ein einziges auch bei der Datenübertragung den Hauptunterschied dar. Diese Reduzierung ist auf die erhöhte Übertragungskapazität und die gewährleistete Übertragungssicherheit des Profinet zurückzuführen. Aufgabe bei der Entwicklung einer Kopplungslösung ist es, den Signaltransfer zwischen den Kommunikationspartnern herzustellen. Dabei ist neben der physikalischen Anbindung auch die Umsetzung der Signale zwischen den unterschiedlichen Busprotokollen zu berücksichtigen. Eine besondere Herausforderung sind hierbei die sicherheitsrelevanten Signale.

Auf Treiberebene geht es bei der Integration im Wesentlichen darum, die übertragenen Signale aus beiden Standards einander anzupassen. Obwohl im M1-Standard die Kommunikation über drei verschiedene Bussysteme erfolgt, ist die übertragene Datenmenge über das Profinet wesentlich größer. Dies liegt im Wesentlichen am technischen Fortschritt in der Bustechnologie und den damit geschaffenen Übertragungskapazitäten, die genutzt werden. Der M1-Roboter verwendet für die verschiedenen Kommunikationsarten unterschiedliche Bussysteme. Die Steuerungsdaten werden über den Interbus ausgetauscht, sicherheitsrelevante Kommunikation wird über den Safetybus P abgewickelt und die Anbindung an die Visualisierung erfolgt über Industrial Ethernet. Alle diese Funktionalitäten sind in M2-Anlagen im Profinet zusammengefasst. Aus dieser Erkenntnis lässt sich die Herausforderung des Treiberbausteins einer Integrationslösung ableiten. Aus der großen Datenmenge der Profinet-Kommunikation müssen die relevanten Daten selektiert und über die jeweiligen Kommunikationswege an den M1-Roboter übermittelt werden.

Auf Applikationsebene gilt es, die Schrittkettenprogramme beider Standards miteinander zu vergleichen. Die Parameter des Schrittkettenbausteins sind im We-

---

sentlichen identisch. Es wurde lediglich im Standard M2 eine Erweiterung um die Parameter ZERO\_OP und OP\_ZEROED vollzogen, die das Zurücksetzen von Operanden ermöglichen. Bei beiden Standards werden Störmeldungen über ALARM\_SQ generiert. Die Verriegelungsüberwachung darf nicht angewandt und die Quittierpflicht bei Fehlern nicht angewählt werden. Zudem ist den beiden Standards gemein, dass jede Schrittkette aus allen parametrisierten Grundstellungen aus anstartbar sein muss. Endschalter von Bereichsbegrenzungen werden jeweils in der Transition überprüft.

Bei den Unterschieden stößt man zunächst auf eine größere Funktionalität im Standard M2, ähnlich wie schon eine größere Datenmenge bei der Kommunikation festzustellen war. Statt maximal 32 Schrittketten im Standard M2 kann der Anwender bis zu 99 Schrittketten benutzen. Ebenso wurde die Anzahl der Grundstellungen von 4 auf 32 erhöht. Ein wesentlicher Unterschied beider Standards liegt in der Speicherung von Daten. Im M1-Standard sind Standard-merkerbereiche für die Variablen vorgesehen, wohingegen diese Standardisierung im M2 entfällt. In Bezug auf die Transitionsüberwachung kann man den technischen Fortschritt des M2 ebenfalls erkennen. Hier wird die Zeitüberwachung von komplexen Komponenten mit eigener Störmelde- und Diagnosefunktion selbst übernommen, während im M1 die Transitionen zentralisiert von der SPS überwacht werden. Der Aufruf eines Schrittkettenbausteines geschieht im M1 über den FC x50 als Zwischenbaustein, welcher im M2 in dieser Form nicht mehr existiert. Allerdings ist im M2 die Quelle für die Parameter der Schrittkette in einer Variablen festgelegt, was im M1 offen bleibt. Die Aufgabe im Rahmen der Anbindung des Roboters an die Zellensteuerung ist die Entwicklung einer Softwarelösung in Form eines oder mehrerer Funktionsbausteine, die die entsprechende softwaretechnische Integration realisieren.

### **6.3.5 Projektspezifische Rahmenbedingungen und Bewertungskriterien**

Ein weiterer Kerninhalt der Analysephase ist die Festlegung der projektspezifischen Rahmenbedingungen und der Kriterien für die Bewertung der Lösungen. Neben der Definition der nicht-monetären Bewertungskriterien steht dabei die Ermittlung der relevanten Größen, wie etwa geplante Laufzeit oder Einsatzhäufigkeit der Lösung, im Fokus.

Im konkreten Projekt wurde die Wiederverwendung von 460 Robotern verfolgt. Ausgehend von den Planungsunterlagen, die die konkreten Anlagenkonzepte beschrieben, wurde ein Bedarf von zusätzlichen 60 Robotern des aktuellen Standards M2 erwartet. Um eine Beurteilung der Auswirkungen der unterschiedlichen Lösungskonzepte auf die Anlagenarchitektur zu ermöglichen, wurde mit den in Tabelle 8 aufgeführten Stückzahlen für relevante Komponenten kalkuliert. Die prognostizierte Laufzeit der geplanten Produktionsanlagen betrug 7 Jahre.

*Tabelle 8: Prognostizierte Anzahl eingesetzter Komponenten*

Komponenten	prognostizierte Stückzahl im Projekt
Industrieroboter Standard M1	460
Industrieroboter Standard M2	60
SPS	40
Bedienterminal groß	40
Bedienterminal klein	20
Ventilinsel	340
Hubeinrichtung	6

Neben den relevanten Einflussgrößen für die monetäre Bewertung wurden ausgehend von den Rahmenbedingungen und Prämissen des Projektes die Kriterien für die nicht-monetäre Bewertung und die entsprechende Gewichtung definiert. Diese sind in Tabelle 9 aufgeführt. Berücksichtigt wurden bei der Festlegung die Orientierungsgrößen, die in Abschnitt 5.4.2 der Arbeit vorgestellt wurden.

*Tabelle 9: Kriterien nicht-monetäre Bewertung*

Nr.	Bezeichnung	Gewichtung
1	Technische Bewertung – Integration Industrieroboter M1	15%
2	Technische Bewertung – Integration Industrieroboter M2	15%
3	Anpassung Bedienkonzept und Visualisierung	10%
4	Integration weiterer Komponenten	10%
5	Komplexität Netzwerkkonzept	15%
6	Komplexität Installation	15%
7	Konformität Projektstrategie	5%
8	Instandhaltung und Betreibbarkeit	15%

---

Das erste Kriterium umfasst die technische Bewertung der Lösung für die ursprüngliche Aufgabe, die Integration des M1-Roboters in die Zellensteuerung. Kommen wenige und technisch einfache Maßnahmen zum Einsatz, so erhält die Lösung eine positive Bewertung, sind viele oder sehr komplexe Maßnahmen notwendig, so resultiert ein negatives Ergebnis. Analog dazu erfolgt die technische Bewertung der Integration der notwendigen Zusatzroboter nach Standard M2. Zusätzlich wird die notwendige Anpassung des Bedienkonzeptes und der Anlagensvisualisierung beurteilt. Des Weiteren wird die Komplexität des Netzwerkkonzeptes und der Installation evaluiert. Die Konformität mit der Projektstrategie und die Instandhaltung und Betriebbarkeit wurden als weitere Kriterien aufgenommen.

## **6.4 Entwurf**

Im Anschluss an die Analysephase erfolgte der Entwurf unterschiedlicher Lösungskonzepte auf Basis der aus den Schnittstellenspezifikationen abgeleiteten Kopplungsaufgabe. Im Rahmen dieser Entwicklungsarbeit kristallisierten sich zwei Ansätze als mögliche Lösungsalternativen heraus. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben.

### **6.4.1 Lösungsvariante „dezentral“**

Die Lösungsvariante „dezentral“ entspricht weitgehend der M2-Struktur. Die Steuerungssoftware, die Visualisierung und alle neuen Komponenten gemäß dem M2-Standard. Zudem geschieht die Kommunikation, wie im M2-Standard gefordert, ausschließlich über ein Busprotokoll, nämlich Profinet. Die Integration des Industrieroboters geschieht hier über eine dezentrale Umwandlung direkt an der jeweiligen Komponente. Das ankommende Profinet-Signal wird vor Ort am Roboter in die einzelnen M1-Kommunikationswege, die Bussysteme Interbus-S, Safetybus P und Industrial Ethernet, aufgeteilt. Die Aufteilung erfolgt über den dezentralen Einsatz von Gateways und E/A-Modulen an jeder integrierten Komponente. Eine zusätzliche Verkabelung in der Anlage ist nicht notwendig. Zusätzlich erforderliche M2-Roboter können direkt an das Profinet Netzwerk angebunden werden. Abbildung 56 zeigt die Konzeptdarstellung des Lösungsansatzes „dezentral“.

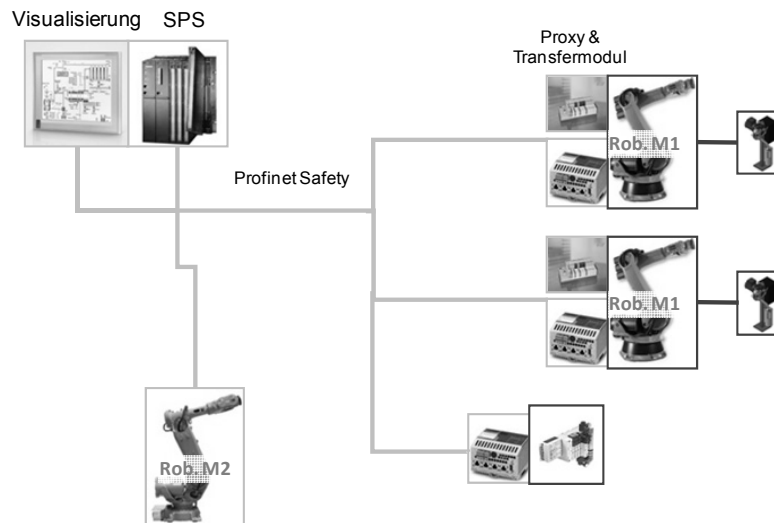


Abbildung 56: Konzeptbild Lösungsansatz „dezentral“

### 6.4.2 Lösungsvariante „zentral“

Auch die Lösungsvariante „zentral“ greift weitgehend auf die M2-Technik zurück. Es wird die im M2 spezifizierte Mensch-Maschine-Schnittstelle benutzt und alle neuen M2-Komponenten werden gemäß dem Standard mit Profinet angeschlossen. Auch die Software der Steuerung entspricht dem M2-Standard. Zusätzlich zu der Profinet-Kommunikationsstruktur werden jedoch Anpassungen zur Anbindung der M1-Komponenten vorgenommen. Die Lösungsvariante „zentral“ baut hierbei auf eine zentralisierte Ansteuerung der Komponenten. Dies bedeutet, dass die komplette Kommunikation mit allen M1-Komponenten über Interbus-S und Safetybus P erfolgt. Um dies zu realisieren, wird zentral ein Interbus-S-Kommunikationsmodul an die zentrale Zellensteuerung angebunden. Zusätzlich übernimmt eine Sicherheits-SPS mit Safetybus P Kommunikation die Verarbeitung der sicherheitsrelevanten Signale der integrierten Roboter. In dieser Lösung sind folglich Steuerung und Bussysteme beider Standards vorhanden. Dies führt dazu, dass jede Komponente, egal ob M1 oder M2, in der ursprünglichen Weise angebunden werden kann. Abbildung 57 zeigt das Konzeptbild des Lösungsansatzes, bei dem die Integration an zentraler Stelle ohne Modifikation an den Komponenten in der Anlagensteuerung erfolgt.

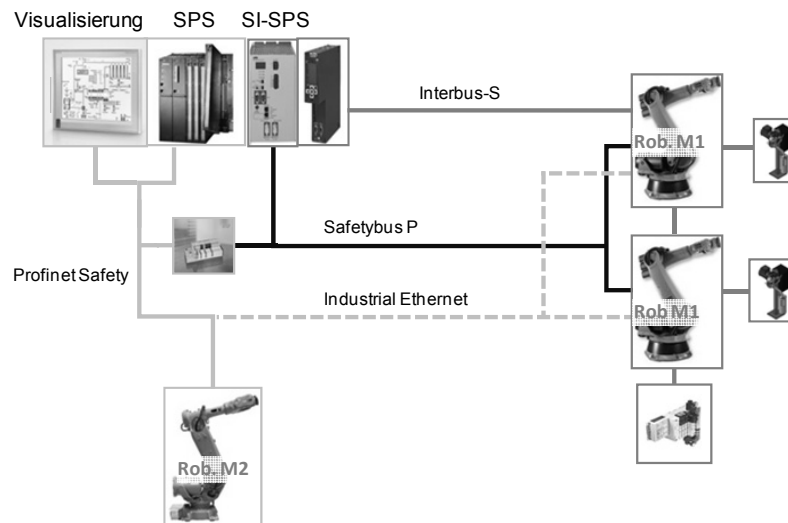


Abbildung 57: Konzeptbild Lösungsansatz „zentral“

## 6.5 Bewertung

Im Anschluss an die Entwurfsphase wurde die Bewertung der Lösungsalternativen durchgeführt. Dabei erfolgte in einem ersten Schritt die monetäre Evaluation unter Anwendung des monetären Bewertungsmodells und unter Berücksichtigung der projektspezifischen Randbedingungen. Im Anschluss daran werden die nicht-monetären Faktoren evaluiert und eine ganzheitliche Betrachtung durchgeführt.

### 6.5.1 Monetäre Bewertung

Bei der monetären Bewertung wird gemäß des in Kapitel 5.4 dieser Arbeit vorgestellten Modells zwischen Einmalkosten, proportionalen Kosten und laufzeitabhängigen Betriebskosteneffekten unterschieden.

Die Einmalkosten für die Lösungsalternativen setzen sich aus dem Aufwand für die Anpassung der Visualisierungssoftware und dem Entwicklungsbedarf im Bereich der SPS zusammen. Die Kosten umfassen dabei neben der reinen Entwicklungsarbeit auch den Aufwand für Test, Freigabe und Dokumentation. Wie in Tabelle 10 ersichtlich ist, wird der Aufwand für beide Lösungsalternativen im Bereich der Visualisierung identisch eingestuft. Die notwendige Entwicklungs-

leistung im Bereich SPS ist bei der Variante „zentral“ aufgrund der notwendigen Anpassungen in der Gesamtsoftwarestruktur größer.

*Tabelle 10: Einmalkosten*

	Variante „zentral“	Variante „dezentral“
Entwicklung Visualisierung	20.000€	20.000€
Entwicklung SPS	30.000€	20.000€
<b>Summe Einmalkosten</b>	<b>50.000€</b>	<b>40.000€</b>

Die proportionalen Kosten sind die Kosten für zusätzliche Komponenten inklusive des zugehörigen Installationsaufwandes. Für die Kalkulation der Kostenwerte werden die Mengengerüstangaben, die in der Analysephase ermittelt wurden, eingesetzt. Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der proportionalen Kosten. Der zusätzliche Aufwand für eine eingesetzte Komponente ist für jede Lösungsalternative dabei rechts dargestellt, der projektspezifische Kostenwert auf Basis des Mengengerüsts findet sich links in der entsprechenden Spalte.

*Tabelle 11: Proportionale Kosten*

	Stückzahl im Projekt	Variante „zentral“		Variante „dezentral“	
		Kosten	Kosten im Projekt	Kosten	Kosten im Projekt
Roboter M2	460	0€	0€	1.700€	782.000€
Roboter M7	60	0€	0€	0€	0€
Ventilinsel	340	200€	68.000€	200€	68.000€
Heber	6	0€	0€	0€	0€
SPS	40	5.000€	200.000€	0€	0€
Bedienterminal	60	0€	0€	0€	0€
<b>Summe Kosten</b>			<b>268.000€</b>		<b>850.000€</b>

In der Lösungsvariante „zentral“ treten keine Kosteneffekte proportional zur Anzahl der integrierten Roboter des M1 und M2 Standards auf. Da der Lösungsansatz eine Anbindung an zentraler Stelle vorsieht, fallen stückzahlbezogene Mehrkosten für jede im Projekt eingesetzte SPS aufgrund der zusätzlichen Sicherheits-SPS, dem Interbus-S-Kommunikationsmodul und der Signalbrücke für den



Transfer sicherheitsrelevanter Signale an. Der „dezentrale“ Lösungsansatz ist durch Mehrkosten bezogen auf jeden zu integrierenden Roboter M1 charakterisiert. Dies ist durch die für jeden Roboter notwendigen Zusatzgeräte Profinet-Interbus-S-Gateway, ausgeführt als Interbus-S-Proxy, und dem Transfermodul für sicherheitsrelevante Signale bedingt. Bei beiden Konzepten treten Zusatzkosten für Interbus-S-Proxy Systeme für die Integration der Ventilinseln auf. Der Gesamtwert der proportionalen Kosten wird für jede Lösung durch Summation gebildet.

Zusätzlich zu den Einmalaufwänden und den proportionalen Kosten werden die Betriebskosteneffekte bei der monetären Evaluation berücksichtigt. Die Auswirkung der unterschiedlichen Lösungskonzepte auf die Betriebskosten wird dabei als Faktor definiert, der Zusatzkosten bezogen auf eine repräsentative Komponentengruppe, sogenannte SPS-Bereiche, und pro Jahr Laufzeit der Anlagen beinhaltet. Ein SPS-Bereich inkludiert eine Steuerung und 13 Industrieroboter. Die beiden Konzepte unterscheiden sich, wie in Tabelle 12 ersichtlich, hierbei um den Faktor 4. Dies ist wesentlich durch die komplexere und damit störanfälligere Netzwerkarchitektur der „zentralen“ Lösung mit drei unterschiedlichen Bussystemen begründet. Die „dezentrale“ Variante besitzt eine einfachere Netzwerkarchitektur. Die zusätzlichen Geräte im Feld führen aber auch hier zu einem geringen Betriebskosteneffekt.

*Tabelle 12: Betriebskosteneffekte*

	Variante „zentral“	Variante „dezentral“
Betriebskosteneffekt 1 Jahr Laufzeit (pro SPS-Bereich)	200€	50€
<b>Betriebskosteneffekt</b> (7 Jahre Laufzeit, 40 SPS-Bereiche)	<b>56.000€</b>	<b>14.000€</b>

Wie in Kapitel 5.4 beschrieben, wird ausgehend von den Ergebnissen für Einmalkosten, Proportionale Kosten und Betriebskosteneffekte ein Gesamtkostenwert durch Summation gebildet. Tabelle 13 zeigt diesen Wert für die „zentrale“ und „dezentrale“ Lösung.

*Tabelle 13: Gesamtkostenwert*

	Variante „zentral“	Variante „dezentral“
Einmalkosten	50.000€	40.000€
Proportionale Kosten	268.000€	850.000€

Betriebskosteneffekt	56.000€	14.000€
<b>Gesamtkostenwert</b>	<b>374.000€</b>	<b>904.000€</b>

### 6.5.2 Nicht-monetäre Bewertung

Zusätzlich zur monetären Bewertung erfolgt die Evaluation der qualitativen Kriterien, die in Abschnitt 6.3.5 festgelegt und erläutert wurden. Abbildung 58 zeigt die Einzelergebnisse und das Gesamtergebnis für die „zentrale“ und „dezentrale“ Lösung. Um eine Objektivität der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden diese im Rahmen von Workshops mit mehreren Fachexperten ermittelt.

Nr.	Bezeichnung	Gewichtung	Lösung "zentral"		Lösung "dezentral"	
			Wert	gew. Wert	Wert	gew. Wert
1	Technische Bewertung – Integration Industrieroboter M1	15%	4	0,6	3	0,45
2	Technische Bewertung – Integration Industrieroboter M2	15%	6	0,9	7	1,05
3	Anpassung Bedienkonzept und Visualisierung	10%	5	0,5	7	0,7
4	Integration weiterer Komponenten	10%	6	0,6	3	0,3
5	Komplexität Netzwerkkonzept	15%	3	0,45	8	1,2
6	Komplexität Installation	15%	3	0,45	8	1,2
7	Konformität Projektstrategie	5%	3	0,15	3	0,15
8	Instandhaltung und Betriebbarkeit	15%	3	0,45	7	1,05
		100%		<b>4,1</b>		<b>6,1</b>

Abbildung 58: Nicht-monetäre Bewertung

Die „zentrale“ Lösung ist der „dezentralen“ Variante in den Bereichen „Integration Roboter M1“ und „Integration weiterer Komponenten“ überlegen. Dies liegt darin begründet, dass keine Veränderungen am Roboter vorgenommen werden müssen und durch die Nutzung von drei Bussystemen ein maximaler Freiheitsgrad in Bezug auf die Integration zusätzlicher Alt- und Neukomponenten gegeben ist. Deutlich besser bewertet wird die „dezentrale“ Lösung hinsichtlich der Kriterien „Integration Roboter M2“, „Anpassung Bedienkonzept“, „Komplexität Netzwerkkonzept“ und „Installation“ sowie „Instandhaltung und Betriebbarkeit“. In Bezug auf das Kriterium „Konformität Projektstrategie“ sind beide Lösungsalternativen gleichwertig, da beide Ansätze der übergeordneten Strategie „Aufbau von technisch einheitlichen Zellen“ nicht entsprechen.

### 6.5.3 Ganzheitliche Bewertung

Um die Auswahl einer Lösungsalternative zu unterstützen, wurde wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, ein Portfolio mit einer Übersicht der diskutierten Kon-

zepte erstellt. Die Ergebnisse der nicht-monetären Evaluation werden dabei über der Abszisse eingetragen, der jeweilige Gesamtkostenwert über der Ordinate. Das Zielgebiet ist durch hohe Resultate der qualitativen Bewertung und geringe Gesamtkostenwerte gekennzeichnet. Abbildung 59 zeigt das Portfolio im konkreten Anwendungsfall.

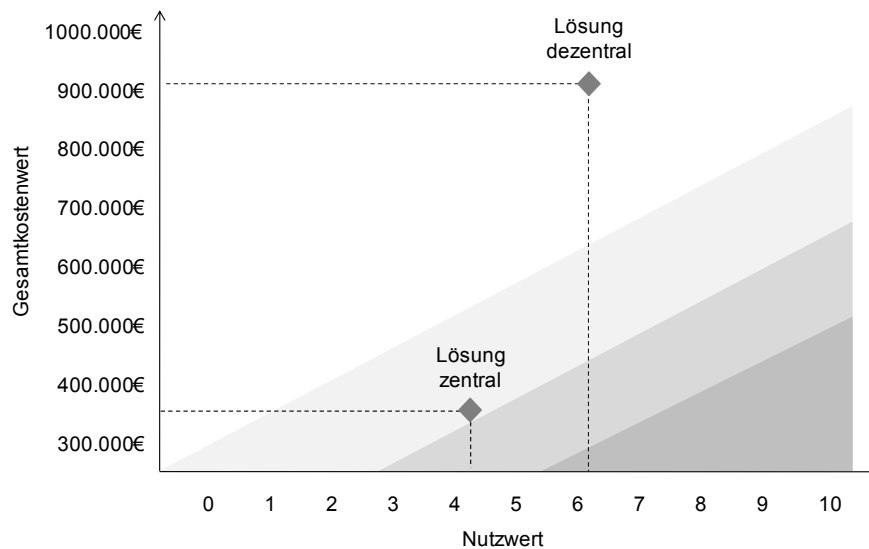


Abbildung 59: Portfolio ganzheitliche Bewertung

Wie in der Portfoliodarstellung ersichtlich, besitzt die „dezentrale“ Lösung einen höheren Nutzwert, der Gesamtkostenwert für die „zentrale“ Lösung liegt deutlich niedriger als der Vergleichswert. Ausgehend von dieser Bewertung fiel im Projekt die Entscheidung für den „zentralen“ Ansatz. Die Nachteile in Bezug auf den Nutzwert wurden in Anbetracht des Kostenvorteils als hinnehmbar eingestuft.

## 6.6 Realisierung

Kerninhalt der Realisierungsphase ist die Detaillierung und Ausarbeitung der Lösung. Ziel ist die Bereitstellung der notwendigen Informationen, Daten und Dokumente für die konkrete Umsetzung der Lösung im Anlagenprojekt.

Während man sich bei der Entscheidungsfindung in erster Linie auf der Ebene der Konzepte bewegt, ist es bei der Umsetzung nötig, die einzelnen Elemente genauer zu spezifizieren. Basis hierfür ist die detaillierte Spezifikation der Komponenten, die in der Analysephase erstellt wurde. Für die Umsetzung werden dann die fachspezifischen Dokumente erstellt. Fertigungs- und Zusammenbau-

zeichnungen dienen der Beschreibung mechanischer Lösungsaspekte, die Elektronik wird in Stromlaufplänen und Anschlussplänen dargestellt und aus der Sicht der Software sind Funktionsbausteine und Softwarepläne zu entwickeln. Der Detaillierungsgrad entspricht hierbei der Auflösung der regulären Standardbeschreibung und stellt damit eine sehr exakte Beschreibung der Lösung dar. Abbildung 60 zeigt exemplarisch den Aufbauplan des Steuerschranks mit integrierter Sicherheits-SPS aus der Elektrokonstruktion.

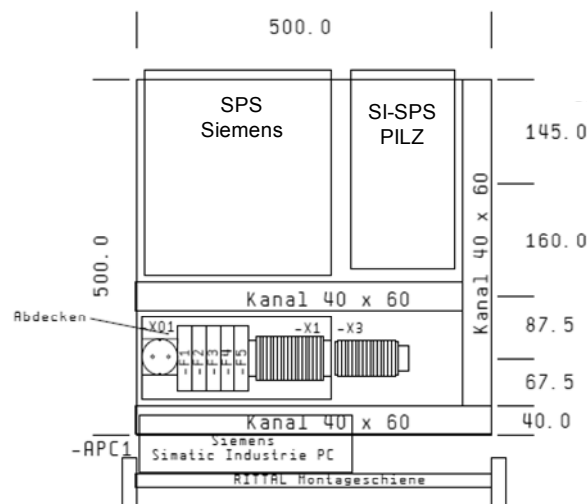


Abbildung 60: Aufbauplan Steuerschrank

Besonderes Augenmerk liegt bei der Dokumentation auf den Integrationslösungen, sprich denjenigen Elementen, die nicht der ursprünglichen Standardisierung entsprechen.

Die detaillierte Gesamtlösung wird schließlich für die Lösungsbibliothek aufbereitet, um für eine Wiederverwendung zur Verfügung zu stehen. Ergebnis der Phase Umsetzung sind alle Dokumente, die nötig sind, um die Anlage zu erstellen, das heißt alle Teile zu fertigen oder zu beschaffen, zu installieren und in Betrieb zu nehmen. Ebenso sind die Verhandlung und die Festlegung von Lieferkonditionen mit den Lieferanten von Kaufteilen Inhalt und die Resultate Ergebnis dieser Phase.

---

## 7 Bewertung von Aufwand und Nutzen

### 7.1 Allgemeines

Das Anwendungsbeispiel in Kapitel 6 zeigt die Relevanz der auf Basis industrieller Anforderungen entwickelten Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik. Ziel dieses Abschnitts der Arbeit ist es, die Aufwand/Nutzen-Relation der Methodik basierend auf den Erfahrungen des Anwendungsbeispiels zu erfassen und zu diskutieren. Betrachtet werden dabei die Einmalaufwände für Einführung und Umsetzung, die kontinuierlichen Aufwände, der monetäre und der qualitative Nutzen. Die Evaluation der qualitativen Faktoren erfolgt dabei anhand der in Abschnitt 4 festgelegten Anforderungen an die Methodik.

Eine klare objektive Bewertung von Aufwand und Nutzen der entwickelten Methodik ist nur durch die Abwicklung eines identischen Projektes einmal mit Einsatz der Methodik und einmal ohne möglich. Dies ist aufgrund des hohen implizierten Aufwands nicht realistisch und kann nicht umgesetzt werden. Die in den folgenden Abschnitten dargestellte Modellrechnung bezieht sich daher auf ein fiktives, aber durchaus charakteristisches Unternehmen mit typischem Projektumfang. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Einführung der Methodik erfolgt über die Berechnung des Kapitalwerts. Die charakteristischen Randbedingungen und Kennwerte der Betrachtung finden sich in Tabelle 14.

*Tabelle 14: Annahmen und Rahmenbedingungen für die Modellrechnung*

Beschreibung	Ausprägung
Stundensatz Mitarbeiter Planung Anlagentechnik	90€
Stundensatz Mitarbeiter Methodenentwicklung	120€
Arbeitsstunden Mitarbeiter pro Monat	160h
Relevantes Projektvolumen Anlagentechnik pro Jahr	20.000.000€
Kalkulationszinssatz	5% p.a.

### 7.2 Einmalaufwand für Einführung

Ist die Einführung der entwickelten Methodik in einem Unternehmen geplant, so ist eine Reihe von Aufwänden notwendig. Diese werden einmalig fällig und kön-

nen im Sinne einer klassischen Investition verstanden werden. Ein Aspekt ist die notwendige Adaption der Methodik an das spezifische Umfeld im Unternehmen. Diese Aufgabe erfordert den Einsatz von Kapazitäten in Höhe von einem Personenmonat eines Methodenentwicklers. Der Transfer der neuen Vorgehensweisen zu den anwendenden Planungsmitarbeitern wird durch Schulungen realisiert. Diese bedingen exemplarisch Aufwände in Höhe von ca. 1,5 Wochen Arbeitseinsatz eines Methodenentwicklers und ca. 1 Woche Einsatz von 5 Planungsmitarbeitern. Für die Umsetzung der Lösungsbibliothek mit Hilfe eines industriellen Datenbanksystems entstehen Kosten für die Erstellung eines Softwarekonzepts, Lizenzgebühren, Customizing und Implementierung. Tabelle 15 zeigt eine Übersicht der Einmalaufwände für die Einführung der Methodik in einem Unternehmen.

*Tabelle 15: Einmalaufwände Einführung*

Aufwandsart	Beschreibung	Aufwand
Unternehmensspezifische Anpassung der Methodik	1 PM Methodenentwickler	19.200€
Schulung Mitarbeiter	1 Woche (1 Coach, 5 Teilnehmer)	25.200€
Umsetzung Lösungsdatenbank	Softwarekonzept, Lizenzen, Implementierung	50.000€
<b>Summe</b>		<b>94.400€</b>

### 7.3 Kontinuierliche Aufwände

Neben den in Abschnitt 7.2 erläuterten einmaligen Kosten fallen bei Anwendung der Methodik in einem Unternehmen auch kontinuierliche Aufwände pro Einsatzjahr an, die in Tabelle 16 dargestellt sind. Ein Aspekt dabei ist die kontinuierliche Optimierung und Anpassung der Methodik an veränderte Rahmenbedingungen für die in der aktuellen Betrachtung eine Personenwoche eines Methodenentwicklers veranschlagt wurde. Ein Personenmonat eines Planungsmitarbeiters ist für die Pflege der Lösungsdatenbank, also die Aktualisierung und Kontrolle der hinterlegten Daten, anzusetzen. Die Kosten für den technischen Betrieb der Lösungsdatenbank umfassen Lizenzgebühren sowie Aufwände für Wartung und notwendige Anpassungen. Die in Tabelle 16 aufgeführten Aufwände beziehen sich jeweils auf den Betrachtungszeitraum eines Jahres.

*Tabelle 16: Kontinuierliche Aufwände*

Aufwandsart	Beschreibung	Aufwand (pro Jahr)
Optimierung Methode	0,25 PM Methodenentwickler	4.800€
Betrieb Lösungsdatenbank	Lizenzkosten, Wartung, Anpassung	5.000€
Pflege Lösungsdatenbank	1 PM Planungsmitarbeiter	14.400€
<b>Summe</b>		<b>24.200€</b>

## 7.4 Monetärer Nutzen

Wie die Betrachtung der kontinuierlichen Aufwände erfolgt die Diskussion des monetären Nutzens der Methodik für den Betrachtungszeitraum eines Jahres. Der monetäre Benefit setzt sich dabei aus zwei Faktoren, der Effizienzsteigerung bei der Entwicklung von Kopplungslösungen und der Reduzierung der Investitionskosten für Kopplungslösungen, zusammen. Tabelle 17 zeigt eine Aufstellung des monetären Nutzens für ein Jahr.

Ausgegangen wird hierbei von 5 Planungsmitarbeitern, die im Unternehmen ganzjährig mit der Entwicklung und Umsetzung anlagentechnischer Konzepte beschäftigt sind. Der Anteil der Tätigkeit für die Erarbeitung von Kopplungslösungen beträgt dabei 10%. Für diesen Arbeitsanteil wird von einer Effizienzsteigerung um 20% ausgegangen. Diese Werte entsprechen auch den im industriellen Anwendungsbeispiel gemachten Erfahrungen. Ausgehend von aktuellen strategischen Konzepten in der Automobilindustrie ist mit einem steigenden Anteil von Integrationsaufgaben in der anlagentechnischen Planung zu rechnen, was einen erhöhten Effekt der effizienteren Entwicklung zur Folge hat.

Der weitere monetäre Nutzen der Methodik ergibt sich aus einer Reduzierung der Investitionskosten im Anlagenprojekt. Erreicht wird dies durch die systematische Entwicklung alternativer Lösungen, die strukturierte und vergleichende Bewertung unter Kostengesichtspunkten und die kontinuierliche Wiederverwendung und Weiterentwicklung existierender Lösungen. In der Betrachtung wird von einem jährlichen Investitionsvolumen von 20 Mio. € ausgegangen. Der Kostenanteil der Lösungen für die Komponentenintegration beträgt 5% der Gesamtsumme. Kalkuliert wird mit einer Einsparung der spezifischen Investitionen von

10%, was auf Basis der Erfahrungswerte aus dem Anwendungsbeispiel als realistisch einzustufen ist.

*Tabelle 17: Monetärer Nutzen*

Monetärer Nutzen	Beschreibung	Nutzen (pro Jahr)
Effizienzsteigerung Lösungsentwicklung	20% Effizienzsteigerung bei 10% relevanten Arbeitsinhalten von 5 Mitarbeitern Planung pro Jahr	18.000€
Reduzierung Investitionskosten Anlagentechnik durch optimale Lösung	10% Reduzierung von 5% relevanten Kosten der Investitionen	100.000€
<b>Summe</b>		<b>118.000€</b>

### 7.5 Monetäre Bewertung

In den Abschnitten 7.2, 7.3 und 7.4 wurden die einmalig und die kontinuierlich anfallenden Aufwände sowie der monetäre Nutzen der Methodik vorgestellt. Im Folgenden wird eine Bewertung durchgeführt, inwiefern der Einsatz der Methodik unter monetären Gesichtspunkten wirtschaftlich ist.

Anwendung findet hierbei die Kapitalwertmethode, bei der Zinseffekte integriert werden, und die alle auf das Bewertungsobjekt bezogenen Zahlungsströme, Ausgaben wie Einnahmen, in einer Betrachtungsperiode berücksichtigt. Tabelle 18 zeigt die Kapitalwertbetrachtung für einen Betrachtungszeitraum von einem bis drei Jahren. Dabei werden zum Investitionsstart die einmaligen Aufwände negativ eingebracht. In den Nutzungsjahren werden die kontinuierlichen Kosten und die monetären Erlöse verrechnet und mit Hilfe des Kalkulationszinssatzes der Kapitalwert berechnet. Wie in der Tabelle ersichtlich, ist der Kapitalwert im ersten Einsatzjahr negativ, ab dem zweiten Jahr werden hohe positive Werte erzielt. Dies bedeutet, dass die Einführung der Methodik in einem Unternehmen ab einer geplanten Einsatzdauer von mehr als einem Jahr einen positiven wirtschaftlichen Effekt besitzt.



*Tabelle 18: Kapitalwert Einführung und Einsatz Methodik*

	Investitions- start	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3
Kalkulationszinssatz		5%	5%	5%
Investition	-94.400€	0€	0€	0€
Laufende Kosten	0€	-24.200€	-24.200€	-24.200€
Monetärer Nutzen	0€	118.000€	118.000€	118.000€
Periodenüber- schüsse	-94.400€	93.800€	93.800€	93.800€
<b>Kapitalwert</b>		<b>-5.067€</b>	<b>80.013€</b>	<b>161.041€</b>

## 7.6 Qualitativer Nutzen

Die Bewertung des qualitativen Nutzens der Methodik erfolgt anhand der in Abschnitt 4 dieser Arbeit festgelegten Anforderungen, die in Tabelle 1 und Tabelle 3 aufgeführt sind.

Die grundsätzlichen Anforderungen an die Methodik, die Anwendbarkeit und die Praxistauglichkeit, wurden im Rahmen des industriellen Anwendungsbeispiels evaluiert und können als voll erfüllt betrachtet werden.

Eine spezifische Anforderung ist die Identifikation und Spezifikation von Integrationsbedarfen in unterschiedlichen Projektsituationen. Wesentliche Hilfe bei der Identifikation ist die Abbildung der Systemschnittstellen mit Hilfe des technischen Kompatibilitätsmodells. Dieses sichert eine vollständige Erfassung der Kopplungsaufgabe durch eine umfassende Betrachtung der Kommunikationsebenen und dient zugleich der vollständigen und klaren Beschreibung der Entwurfsaufgabe. Insgesamt kann somit diese Anforderung als erfüllt eingestuft werden.

Die Erstellung von technischen Integrationskonzepten ist die Kernanforderung an die entwickelte Methodik. Die strukturierte Abfolge der Aktivitäten des Vorgehensmodells trägt zu einem effizienten Entwicklungsprozess bei. Zudem steigert die klare Gliederung des Prozesses in vier Phasen mit spezifischen Aufgaben und Zielsetzungen die Transparenz deutlich. Die Wiederverwendung bestehender Lösungen wird durch eine Lösungsdatenbank und die Recherche in derselben als definierte Aktivität in der Entwurfsphase sichergestellt. Die strukturierte Ent-

wicklung und die vollständige Systembeschreibung über das Ebenenmodell unterstützen den Entwurf optimaler Lösungen, die eine hohe Funktionssicherheit und anforderungsgerechte Verfügbarkeit gewährleisten. Zudem ist die Absicherung der Entwicklungsergebnisse durch Freigabetests und Erprobungen Inhalt der Realisierungsphase. Zusammenfassend ist die Anforderung als erfüllt zu werten.

Neben der Erstellung ist die Bewertung der Kopplungslösung eine Anforderung aus Kapitel 4 dieser Arbeit. Die entwickelte Methodik bietet ein Bewertungsmodell für die monetäre und nicht-monetäre Evaluation der entwickelten Lösungen. Die Durchführung der Bewertung ist als eigene Phase des Vorgehensmodells fest in die Lösungsentwicklung integriert. Die Anforderung kann somit als vollständig erfüllt betrachtet werden.

Abschließende spezifische Anforderung an die Methodik ist die Bereitstellung aller notwendigen Daten und Dokumente für die Planung, Erstellung und den Betrieb der Kopplungslösung. Die Ausarbeitung der entsprechenden Unterlagen ist Teil der Realisierungsphase. Die Lösungsbibliothek bietet die Möglichkeit diese zu archivieren und später bedarfsgerecht bereitzustellen. Insgesamt ist auch diese Anforderung als erfüllt einzustufen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die gestellten Anforderungen durch die Methodik vollständig erfüllt werden. Von besonderer Bedeutung sind hierbei jedoch die korrekte Anwendung der Methodik und die Berücksichtigung aller Aktivitäten und Vorgaben.

### **7.7 Fazit**

Ziel von Kapitel 7 dieser Arbeit ist die kritische Diskussion der entwickelten Methodik sowie die Bewertung des implizierten Aufwands und des Nutzens. Um diese Zielsetzung zu erreichen, wurden die Einmalaufwände, die bei der Einführung der Methodik in einem Unternehmen anfallen, und die laufenden Kosten, die kontinuierlich während des Einsatzes entstehen, erläutert. Die Betrachtung erfolgte dabei anhand eines fiktiven aber exemplarischen Unternehmens mit spezifischen Kenngrößen. Auf Basis der Erkenntnisse aus dem industriellen Anwendungsbeispiel wurde der monetäre Nutzen der Methodik abgeschätzt. Wesentliche Effekte sind dabei durch eine effizientere Lösungsentwicklung und durch

---

eine Reduzierung der spezifischen Investitionen aufgrund besserer technischer Kopplungskonzepte begründet.

Die Gegenüberstellung des monetären Aufwands und Nutzens bzw. die Wirtschaftlichkeitsbewertung erfolgte anschließend über die Berechnung des Kapitalwerts unter Berücksichtigung von Zinseffekten. Dabei zeigte sich, dass die Methodik erst bei einer Einsatzdauer von zwei Jahren einen positiven Wirtschaftlichen Effekt erzielt. Der errechnete Kapitalwert weist dann aber einen hohen positiven Wert auf, was auf ein sehr vorteilhaftes Aufwand-Nutzen-Verhältnis hinweist.

Die Diskussion des qualitativen Nutzens der Methodik erfolgte anhand der in Kapitel 4 auf Basis der Grundlagen und des Standes der Technik definierten Anforderungen. Hierbei zeigte sich, dass die vier wesentlichen Grundanforderungen vollständig durch die Methodik erfüllt werden und somit, neben den wirtschaftlichen Effekten, auch ein deutlicher qualitativer Nutzen zu erwarten ist.



---

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Produzierende Unternehmen stehen heute vor der Herausforderung, in einem durch hohe Dynamik und einem hohen Maß an Unvorhersehbarkeit geprägten Umfeld wirtschaftlich agieren zu müssen. Bereits 2002 postulierte WIENDAHL folglich Wandlungsfähigkeit als Schlüsselbegriff für die und wesentliche Anforderung an die zukunftsfähige Fabrik (2002). Dieses Bedürfnis nach Wandlungsfähigkeit gilt für alle Produktionsbeteiligten, stellt aber besonders die hoch und höchst automatisierten Gewerke vor große Herausforderungen. So ist die Notwendigkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme auch im Bereich der Herstellung von Fahrzeugkarosserien, dem Segment der deutschen Leitindustrie Automotive mit dem höchsten Automatisierungsgrad, entscheidendes Kriterium für eine erfolgreiche Zukunft. Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag dazu, ein erhöhtes Maß an Wandlungsfähigkeit in automatisierten Produktionsszenarien, insbesondere dem automobilen Karosseriebau, durch eine vereinfachte Rekonfiguration von Produktionsanlagen zu erzielen.

Basis für die Arbeit bildet dabei eine umfassende Untersuchung der Grundlagen des automobilen Karosseriebaus in Kapitel 2. Neben einer produktionsbezogenen Eingliederung, die Fertigungsprinzip, Einordnung in der Fahrzeugproduktion und wirtschaftliche Bedeutung erläutert, werden technische Aspekte der eingesetzten Anlagentechnik diskutiert. Vorgestellt werden dabei Aufbau, Struktur und technische Ausprägung von Karosseriebausystemen. Anschließend werden der Planungsprozess sowie typische Vorgehensweisen der Automobilindustrie präsentiert und aktuelle Herausforderungen bei der Anlagenrekonfiguration, wie Integrationsprojekte oder die Wiederverwendung von Anlagentechnik, diskutiert.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen zeigt Kapitel 3 relevante Arbeiten aus dem Stand der Forschung und Technik. Grundlegende Ansätze aus dem Forschungsgebiet der flexiblen und wandlungsfähigen Produktion werden vorgestellt. Ergänzend werden verschiedene Arbeiten, die sich mit einer verbesserten Kompatibilität von technischen Systemen auseinandersetzen, erläutert. Allgemeine Kommunikationsmodelle, standardisierte Busprotokolle und adaptive Schnittstellen stehen dabei im Mittelpunkt. Weiterer Kernaspekt ist die Analyse existierender Vorarbeiten zur Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen. Unterschieden wird hierbei zwischen Methoden bzw. Vorgehensweisen und Bewertungsansätzen. Als Fazit der Betrachtungen wurden zwei wesentliche Erkenntnisse abgeleitet. Zum einen ist die Kompatibilität anlagentechnischer Automatisierungskom-

ponenten und -systeme für zukünftige Produktionsszenarien, die durch häufige Rekonfigurationen charakterisiert sind, trotz zahlreicher und vielversprechender Ansätze nicht ausreichend. Zum anderen ist die Entwicklung technischer Integrationslösungen, also technischen Konzepten, die die Verbindung zwischen nicht kompatiblen Systemen herstellen, nur unzureichend methodisch unterstützt, obwohl diese Aktivität zukünftig eine wesentliche Aufgabe bei der Planung von Rekonfigurationsmaßnahmen darstellen wird.

Die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik, unterschieden wird dabei zwischen allgemeinen und aufgabenspezifischen Anforderungen, sind Inhalt von Kapitel 4 dieser Arbeit. Basis für die Anforderungsanalyse sind die Ergebnisse aus der Untersuchung der Grundlagen und der Erörterung des Stands der Forschung und Technik.

Die Darstellung der entwickelten Methodik erfolgt in Kapitel 5 und gliedert sich in eine Übersicht und eine Beschreibung der Einzelelemente. Ein technisches Kompatibilitätsmodell dient im Rahmen der Methodik als Mittel für die Systemanalyse und die Aufgabenspezifikation durch eine Gliederung der Interaktion in unterschiedliche Ebenen und die Integration funktionaler Aspekte. Das entworfene Bewertungsmodell ermöglicht eine vergleichende Evaluation alternativer technischer Lösungen unter Berücksichtigung quantitativer und qualitativer Gesichtspunkte. Die Wiederverwendung und kontinuierliche Verbesserung der Lösungskonzepte wird durch eine Lösungsbibliothek sichergestellt. Verknüpft werden die Einzelelemente durch ein Vorgehensmodell, welches die Lösungsentwicklung strukturiert und in vier Hauptphasen mit definierten Zielen, Aktivitäten und Ergebnissen einteilt.

Die Anwendung der Methodik in einem industriellen Beispiel ist Kern von Kapitel 6. Das bearbeitete Szenario umfasste dabei die Wiederverwendung von Industrierobotern für die Erstellung neuer Produktionsanlagen. Für die Entwicklung der technischen Kopplungslösung wurden das Vorgehensmodell und das technische Kompatibilitätsmodell zur Spezifikation der Systemelemente verwendet.

Kapitel 7 bildet den Abschluss der Arbeit und beinhaltet eine Diskussion des Nutzens und des implizierten Aufwands bei der Anwendung der Methodik in einem Unternehmen. Die monetäre Betrachtung berücksichtigt die einmal fälligen und die kontinuierlichen Aufwände sowie den quantifizierbaren Nutzen der Methodik in einer Modellrechnung. Die Diskussion der qualitativen Effekte er-

---

folgt anhand der Anforderungen, die die Grundlage für die Entwicklung darstellen. Die Basis für die Diskussion und die Bewertung der Methodik bilden die Erfahrungswerte aus dem industriellen Anwendungsbeispiel. Als Resultat der Betrachtungen zeigt sich, dass die Methodik die gestellten Anforderungen in vollem Umfang erfüllt und ein positives Aufwand/Nutzen-Verhältnis zu erwarten ist.

Die vorliegende Arbeit bietet eine umfassende Methodik für die strukturierte und aufwandsarme Entwicklung von technischen Integrationskonzepten, wie sie bei der Durchführung von Rekonfigurationsmaßnahmen in hochautomatisierten Produktionsanlagen notwendig sind. Obwohl somit ein grundlegender und wichtiger Beitrag für die Etablierung von Rekonfigurations- und damit Wandlungsprozessen in produzierenden Unternehmen geleistet wurde, besteht weiterhin erheblicher Handlungsbedarf, um Unternehmen mit der Reaktionsfähigkeit auszustatten, die in einem verschärften globalen Wettbewerb unter turbulenten Rahmenbedingungen notwendig ist.

Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Weiterentwicklung adaptiver und skalierbarer Schnittstellen im Automatisierungsumfeld. Die im Stand der Technik skizzierten existierenden ersten Ansätze Plug&Play-Technologie auch für Produktionsanlagen einzusetzen sind sehr vielversprechend und können erhebliche Potentiale für wandlungsfähige Fertigungssysteme bieten. Die Detaillierung und Umsetzung dieser Ideen ist neben einem Betätigungsfeld für die wissenschaftliche Forschung nicht zuletzt eine Aufgabe für die Hersteller von Automatisierungstechnik und entsprechende Normungseinrichtungen und –verbände.

Des Weiteren gilt es, neben der Berücksichtigung technischer Aspekte der Wandlungsfähigkeit Unternehmen auch organisatorisch auf Wandlungsszenarien vorzubereiten. Arbeitsorganisation und Mitarbeiterqualifikation müssen an heterogene und dynamische Produktionsstrukturen mit entsprechenden Betriebsmitteln angepasst und notwendige Methoden und Werkzeuge entwickelt werden.

Notwendig ist zudem eine stärkere Berücksichtigung von Wandlungsaspekten in der operativen Finanzplanung und der taktischen und strategischen Budgetierung. Obwohl erste Ansätze für die Bewertung und Planung von Wandlungsfähigkeit existieren (vgl. Abschnitt 3.4.2) und auch diese Arbeit einen Beitrag zur Steigerung der Kostentransparenz leistet, ist diese in der Praxis produzierender Unternehmen nur unzureichend und erschwert die Realisierung wandlungsfähiger Systeme und damit die Umsetzung erfolgreicher Wandlungsprozesse.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur aufwandsarmen Rekonfiguration automatisierter Produktionsanlagen leistet. Dies ermöglicht produzierenden Unternehmen zukünftig eine schnelle und effiziente Reaktion auf veränderte Rahmenbedingungen in einem turbulenten Umfeld und sichert so deren Konkurrenzfähigkeit in einem verschärften globalen Wettbewerb.



---

## 9 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. München: Hanser, Carl 2011.

ABELE & STANIK 2007

Abele, E.; Stanik, M.: Mehrtechnologie-orientierte rekonfigurierbare Werkzeugmaschine. Bamberg: Meisenbach 2007.

AGGTELEKY 1987

Aggteleky, B.: Fabrikplanung (Band 1: Grundlagen, Zielplanung, Vorarbeiten). 2. Aufl. München: Hanser 1987.

AGGTELEKY 1990

Aggteleky, B.: Fabrikplanung (Band 2: Betriebsanalyse und Feasibility-Studie). 2. Aufl. München: Hanser 1990.

BARTH 2002

Barth, H.: Effizient in der Nische. Automobil Industrie 2002, S. 10-15.

BEACH ET AL. 2000

Beach, R.; Muhlemann, A. P.; Price, D. H. R.; Paterson, A.; Sharp, J. A.: A Review of Manufacturing Flexibility. European Journal of Operational Research 122 (2000) 1, S. 41-57.

BECKER 2007

Becker, H.: Auf Crashkurs. New York: Springer Verlag 2007.

BECKER 2009

Becker, H.: Investition und Finanzierung. 3. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2009.

BECKER 2006

Becker, N.: Automatisierungstechnik. 1. Aufl. Würzburg: Vogel 2006.

### BERGER 2010

Berger, H.: Automatisieren mit SIMATIC. 4. Aufl. Erlangen: Publicis Publishing 2010.

### BERNING 2001

Berning, R.: Grundlagen der Produktion. 1. Aufl. Aufl. Berlin: Cornelsen 2001.

### BMW 2007

BMW (Hrsg.): Technologische Standards - Best Practice Lösungen zu Standards erheben (unternehmensinterner Leitfadens). München: 2007.

### BMW I 2011

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Schlaglichter der Wirtschaftspolitik. Berlin: 2011.

### BOYSEN 2005

Boysen, N.: Variantenfließfertigung. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 2005.

### BRAESS 2007

Braess, Hans-Hermann (Hrsg.): Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg 2007.

### BULLINGER ET AL. 2002

Bullinger, H.-J.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E.: Neue Organisationsformen im Unternehmen. 2., neu bearb. u. erw Aufl. Berlin: Springer 2002.

### BUNDESVERBAND MATERIALWIRTSCHAFT 2008

Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik (Hrsg.): Best Practice in Einkauf und Logistik. Wiesbaden: Gabler 2008.

### BÜSCH 2007

Büsch, M.: Praxishandbuch Strategischer Einkauf. New York: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GWV Fachverlage GmbH 2007.

### CHAKRAVARTHY 1997

Chakravarthy, B.: A New Strategy Framework for Coping with Turbulence. Sloan Management Review (1997) 2, S. 69-82.

---

CHRYSOLOURIS 1996

Chrysolouris, G.: Flexibility and its Measurement. CIRP Annals - Manufacturing Technology 45 (1996) 2, S. 581-587.

CISEK 2005

Cisek, R.: Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. München: Utz 2005.

CISEK ET AL. 2002

Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002), S. 441-445.

CROSER & EBEL 2006

Croser, P.; Ebel, F.: Pneumatik. Berlin: Springer Verlag 2006.

DAENZER 1988

Daenzer, W. F.: Systems Engineering. 6. Aufl. Zürich: Verlag Industrielle Organisation 1988.

DASHCHENKO 2006

Dashchenko, Anatoli I. (Hrsg.): Reconfigureable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Berlin, Heidelberg: Springer 2006.

DE TONI & TONCHIA 1998

De Toni, A.; Tonchia, S.: Manufacturing flexibility: a literature review. International Journal of Production Research 36 (1998) 6, S. 1587-1617.

DEUSE ET AL. 2006

Deuse, J.; Petzelt, D.; Sackermann, R.: Modellbildung im Industrial Engineering. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) 1-2, S. 66-69.

DORNHEIM 2006

Dornheim, M.: Das Mercedes-Benz Development System. Wien: 2006.

### DOVE 2001

Dove, R.: Agile Production: Design Principles for Highly Adaptable Systems. In: Zandin, K. B. et al. (Hrsg.): Maynard's Industrial Engineering Handbook. New York, Blacklick: McGraw-Hill Professional Pub. 2001.

### DÜRRSCHMIDT 2001

Dürschmidt, S.: Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion. München: Utz 2001.

### EHRENSTRASSER 2010

Ehrenstrasser, M.: Konfigurieren statt Konstruieren –mechatronisches Engineering im Entstehungsprozess von Karosseriebauanlagen. Fulda: 10.11.2010.

### ELMARAGHY 2006

ElMaraghy, H. A.: Flexible and Reconfigureable Manufacturing Systems Paradigms. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 17 (2006) 4, S. 261-276.

### ELMARAGHY & WIENDAHL 2012

ElMaraghy, H.; Wiendahl, H.-P.: Changeability - An Introduction. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 3-24.

### EVERSHEIM & SCHMIDT 2001

Eversheim, W.; Schmidt, K.: Integrierte Ablauf- und Strukturplanung. In: RWTH (Hrsg.): Arbeits- und Ergebnisbericht 1999-2001 des SFB 361 "Modelle und Methoden zur integrierten Produkt- und Prozessgestaltung". Aachen 2001, S. 830-845.

### FAVRE-BULLE 2004

Favre-Bulle, B.: Automatisierung komplexer Industrieprozesse. 1. Aufl. Wien: Springer 2004.

### FELIX 1998

Felix, H.: Unternehmens- und Fabrikplanung. 1. Aufl. München: Hanser 1998.

---

FÜSSEL 2003

Füssel, U.: Fertigungstechnik I: Fügetechnik (Vorlesungsskript). Dresden: Technische Universität Dresden 2003.

GEVATTER 2000

Gevatter, H.-J.: Automatisierungstechnik. Berlin: Springer 2000.

GEVATTER 2006

Gevatter, H.-J.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion. 2. Aufl. Berlin: Springer 2006.

GIENKE ET AL. 2007

Gienke, H.; Kämpf, R.; Aldinger, L.: Handbuch Produktion. München: Hanser 2007.

GÖTZE 2008

Götze, U.: Investitionsrechnung. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.

GRUNDIG 2009

Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. 3. Aufl. München: Hanser 2009.

HÄCKELMANN ET AL. 2000

Häckelmann, H.; Petzold, H.-J.; Strahringer, S.: Kommunikationssysteme. Berlin: Springer 2000.

HALLER 1999

Haller, M.: Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflusssysteme der variantenreichen Großserienproduktion. München: Utz 1999.

HEGER 2007

Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Garbsen: PZH, Produktionstechn. Zentrum 2007.

HEISEL & MARTIN 2004

Heisel, U.; Martin, M.: Rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme. wt Werkstattstechnik online 94 (2004) 10, S. 517-520.

HILDEBRAND ET AL. 2005

Hildebrand, T.; Mäding, K.; Günther, U.: PLUG + PRODUCE. Chemnitz: IBF - Inst. für Betriebswiss. und Fabrikssysteme Techn. Univ. 2005.

HOMMEL & PRITSCH 1999

Hommel, U.; Pritsch, G.: Marktorientierte Investitionsbewertung mit dem Realoptionenansatz. Finanzmarkt und Portfolio Management 2 (1999), S. 121-144.

ISO 1994

International Organization for Standardization (ISO) / International Electrotechnical Commission (IEC) 7498-1:1994(E): Information Technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model. Genf: 1994.

ISERMANN 2008

Isermann, R.: Mechatronische Systeme. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2008.

KETTNER ET AL. 1984

Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München: Hanser 1984.

KIEFER 2007

Kiefer, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau (Dissertation). Saarbrücken: Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM Universität des Saarlands 2007.

KISTNER & STEVEN 2001

Kistner, K.-P.; Steven, M.: Produktionsplanung. 3. Aufl. Heidelberg: Physica-Verlag 2001.

KOCHAN 2002

Kochan, Anna (Hrsg.): World Automotive Manufacturing Special Report. 2002.

KOETHER & RAU 2008

Koether, R.; Rau, W.: Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure. 3. Aufl. München: Hanser 2008.

---

KOHLER 2008

Kohler, U.: Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme. München: Utz 2008.

KOREN 2005

Koren, Y.: Reconfigureable Manufacturing and Beyond (Keynote Paper). Ann Arbor, USA: 2005.

KOREN 2006

Koren, Y.: General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Berlin; Heidelberg: Springer 2006, S. 37-45.

KOREN ET AL. 1999

Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; van Brussel, H.: Reconfigureable Manufacturing Systems. Annals of the CIRP 48 (1999) 2, S. 527-540.

LANGMANN 2004

Langmann, R.: Taschenbuch der Automatisierung. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 2004.

LOREK ET AL. 2002

Lorek, D.; Lorenzen, T.; Mellot, R.: Business Value of Manufacturing Flexibility (Master Thesis). Michigan State University. East Lansing (MI) 2002.

MEHRABI ET AL. 2002

Mehrabi, M. G.; Ulsoy, G.; Koren, Y.; Heytler, P.: Trends and Perspectives in Flexible and Reconfigureable Manufacturing Systems. Journal of Intelligent Manufacturing 13 (2002) 2, S. 135-146.

MEICHSNER 2007

Meichsner, T. P.: Migrationskonzept für einen modell- und variantenflexiblen Automobilkarosseriebau. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum 2007.

MELING 2009

Meling, F.: Expertengespräche BMW AG. Braitmeyer, D.; Grimmer, K.; Ziegler, P.; Zuber, E.; Zurl, F. (unveröffentlichtes Interviewmaterial). München: 2009.

### MELING 2010

Meling, F.: Expertengespräche Daimler AG. Denker, D.; Fröhlich, J.; Kochs, W. (unveröffentlichtes Interviewmaterial). Sindelfingen: 2010.

### MERKEL 2011

Merkel, A.: Video-Podcast der Bundeskanzlerin 04/2011. Berlin: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2011.

### MILBERG 2000

Milberg, J.: Unternehmenspolitik im Wandel. In: Reinhart, G. (Hrsg.): ... nur der Wandel bleibt. München: Utz 2000.

### MILBERG & MAUDERER 1996

Milberg, J.; Mauderer, M.: Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen. München: Utz 1996.

### MÖLLER 2008

Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. München: Utz 2008.

### MORALES 2003

Morales, H. R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Düsseldorf: VDI-Verlag 2003.

### MÜLLER 2008

Müller, S.: Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. München: Utz 2008.

### NARAIN ET AL. 2000

Narain, R.; Yadav, R. C.; Sarkis, J.; Cordeiro, J. J.: The strategic implications of flexibility in manufacturing systems. International Journal of Agile Management Systems (2000) 2/3, S. 202-213.

### NEUHAUSEN 2001

Neuhausen, J.: Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion (Dissertation). Aachen: RWTH 2001.



---

NYHUIS ET AL. 2007

Nyhuis, P.; Kolakowski, M.; Heinen, T.: Adequate and Economic Factory Transformability - Results of a Benchmarking. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): 2nd International Conference on Changeable, Agile and Virtual Production (CARV). Windsor 2007.

NYHUIS 2008

Nyhuis, Peter (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Garbsen: PZH, Produktionstechn. Zentrum 2008.

OLIVER WYMAN 2006

Oliver Wyman (Hrsg.): The Harbour Report 2006. Troy: 2006.

OSACA 1995

OSACA (Hrsg.): Final Report. 1995.

PIGAN & METTER 2008

Pigan, R.; Metter, M.: Automating with PROFINET. 2. Aufl. Erlangen: Publicis Publishing 2008.

PRITSCHOW ET AL. 2001

Pritschow, G.; Altintas, Y.; Jovane, F.; Koren, Y.; Mitsuishi, M.; Takata, S.; van Brussel, H.; Weck, M.; Yamazaki, K.: Open Controller Architecture - Past, Present and Future. CIRP Annals - Manufacturing Technology 50 (2001) 2, S. 463-470.

REFA 1990

REFA (Hrsg.): Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. München: Hanser 1990.

REICHEL 2009

Reichel, J.: Betriebliche Instandhaltung. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer 2009.

REINHARDT 2006

Reinhardt, H.: Automatisierungstechnik. Berlin: Springer Verlag 2006.

### REINHART 2000

Reinhart, G.: Im Denken und Handeln wandeln. In: Reinhart, G. (Hrsg.): ... nur der Wandel bleibt. München: Utz 2000, S. 17-40.

### REINHART ET AL. 2002

Reinhart, G.; Berlak, J.; Effert, C.; Selke, C.: Wandlungsfähige Fabrikgestaltung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002), S. 18-23.

### REINHART & KRUG 2012

Reinhart, G.; Krug, S.: Automatic Configuration (Plug & Produce) of Robot System - Data Interpretation and Exchange. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 147-152.

### REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G.; Krug, S.; Huettner, S.: Automatic Configuration of Robot System - Upward and Downward Integration. In: RWTH Aachen (Hrsg.): 4th International Conference on Industrial Robotics and Application. Aachen, 6.-9.12.2011. Aachen 2011.

### REINHART & MELING 2012

Reinhart, G.; Meling, F.: Methodology for the Support of Reconfiguration Processes in the Automotive Body Shop. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 358-363.

### REINHART ET AL. 2009

Reinhart, G.; Meling, F.; Zuber, E.: Line Equipment in Asynchronous Life Cycles - Future Challenge for the Automotive Body-Shop. In: Zaeh, M. (Hrsg.): 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). München: Utz 2009, S. 642-650.

### REISSENWEBER 2009

Reissenweber, B.: Feldbussysteme zur industriellen Kommunikation. 3. Aufl. München: Oldenbourg-Industrieverlag 2009.

### RICHTER 2007

Richter, A.: Entwicklung und Umsetzung eines Kennzahlensystems zur Leistungsmessung im Karosseriebau (Dissertation). Dresden: Technische Universität Dresden 2007.

---

RÖHRIG 2002

Röhrig, M.: Variantenbeherrschung mit hochflexiblen Produktionsendstufen (Dissertation). Düsseldorf: VDI-Verlag 2002.

SAAKE ET AL. 2010

Saake, G.; Sattler, K.-U.; Heuer, A.: Datenbanken. 4. Aufl. Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg: mitp 2010.

SCHÄFER 2005

Schäfer, H.: Unternehmensinvestitionen. 2. Aufl. Heidelberg: Physica-Verlag 2005.

SCHMIGALLA 1995

Schmigalla, H.: Fabrikplanung. 1. Aufl. München: Hanser 1995

.

SCHNEEWEIß & KÜHN 1990

Schneeweiß, C.; Kühn, M.: Zur Definition und gegenseitigen Abgrenzung der Begriffe Flexibilität, Elastizität und Robustheit. ZfB Zeitschrift für Betriebswirtschaft 60 (1990), S. 378-395.

SCHROM 2003

Schrom, H.: Realisierung eines optimierten Feldbussystems und Modellierung mit Petrinetzen. Braunschweig: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig Online Veröffentlichung 2003.

SEKINE ET AL. 1991

Sekine, Y.; Koyama, S.; Imazu, H. (Hrsg.): Nissan's New Production System: Intelligent Body Assembly System. Proceedings of the 1991 SAE International Congress and Exposition. Detroit 1991.

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in Manufacturing: A Survey. The Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990) 4, S. 289-328.

SHEWCHUK & MOODIE 1998

Shewchuk, J. P.; Moodie, C. L.: Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures. The Journal of Flexible Manufacturing Systems 10 (1998) 4, S. 325-349.

SHIMOKAWA 1997

Shimokawa, K.: Transforming automobile assembly. Berlin: Springer 1997.

SPATH & BAUMEISTER 2001

Spath, D.; Baumeister, M.: Ist Flexibilität genug? Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 96 (2001) 5, S. 235-241.

SPATH ET AL. 2002

Spath, D.; Baumeister, M.; Rasch, D.: Wandlungsfähigkeit und Planung von Fabriken. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002) 1-2, S. 28-31.

SPATH & SCHOLTZ 2007

Spath, D.; Scholtz, O.: Wandlungsfähigkeit für eine wirtschaftliche Montage in Deutschland. Industrie Management 23 (2007) 2, S. 61-64.

SPIECKERMANN ET AL. 2000

Spieckermann, S.; Gutenschwager, K.; Heinzel, H.; Voß, S.: Simulation-Based Optimization in the Automotive Industry: A Case Study on Body-Shop Design. Simulation 5 (2000) 75, S. 276-286.

STIEGLER 1999

Stiegler, G.: Produktionsplanung und Produktionssysteme im Fahrzeugbau. Wien: Manz 1999.

STREBEL 2007

Strebel, H.: Innovations- und Technologiemanagement. 2. Aufl. Stuttgart: UTB GmbH 2007.

STROHRMANN 1998

Strohrmann, G.: Automatisierungstechnik 1. 4. Aufl. München: Oldenbourg 1998.

VDA 2010

Verband der Automobilindustrie: Jahresbericht 2010. Berlin: 2010.

VDA 2011

Verband der Automobilindustrie: Jahresbericht 2011. Berlin: 2011.

---

VDW 1998

Verein deutscher Werkzeugmaschinenfabriken: HÜMNOS Abschlussbericht. Frankfurt: 1998.

VOSSEN 2008

Vossen, G.: Datenmodelle, Datenbanksprachen und Datenbankmanagementsysteme. München, Wien: Oldenbourg 2008.

WALLENTOWITZ ET AL. 2010

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010.

WALLENTOWITZ ET AL. 2009

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: Strategien in der Automobilindustrie. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009.

WEBER 2006

Weber, K. H.: Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006.

WECK & BRECHER 2006

Weck, M.; Brecher, C.: Automatisierung von Maschinen und Anlagen. 6. Aufl. Berlin: Springer 2006.

WEIDENFELLER 2002

Weidenfeller, H.: Grundlagen der Kommunikationstechnik. 1. Aufl. Stuttgart; Leipzig; Wiesbaden: Teubner 2002.

WELLENREUTHER & ZASTROW 2005

Wellenreuther, G.; Zastrow, D.: Automatisieren mit SPS. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2005.

WEMHÖNER 2006

Wemhöner, N.: Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau (Dissertation). Aachen: Shaker 2006.

### WERTH 2007

Werth, D.: Modellierung unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse. 1. Aufl. Bremen, Hamburg: Salzwasser-Verlag 2007.

### WESTKÄMPER 1999

Westkämper, E.: Die Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. wt Werkstattstechnik online 89 (1999) 4, S. 131-140.

### WESTKÄMPER & ZAHN 2008

Westkämper, E.; Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. 1. Aufl. Berlin: Springer 2008.

### WIENDAHL 1996

Wiendahl, H.-P.: Neue Planungsverfahren. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Betriebshütte - Produktion und Management. Berlin: Springer 1996.

### WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 4, S. 122-127.

### WIENDAHL 2005

Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Planung modularer Fabriken. München: Hanser 2005.

### WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. München: Hanser 2010.

### WIENDAHL ET AL. 2007A

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zaeh, M. F.; Duffie, N.; Kolakowski, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. Annals of the CIRP 56 (2007) 2.

### WIENDAHL ET AL. 2007B

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Zaeh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Kolakowaski, M.: Changeable Manufacturing: Classification, Design, Operation. Annals of the CIRP 56 (2007) 2.

### ZACHER 2000

Zacher, S.: Automatisierungstechnik kompakt. Braunschweig: Vieweg 2000.

---

ZÄH ET AL. 2005A

Zaeh, M. F.; Möller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München: Utz 2005, S. 3-10.

ZÄH ET AL. 2005B

Zäh, M. F.; Müller, N.; Aull, F.; Sudhoff, W.: Digitale Planungswerkzeuge. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 4, S. 175-180.

ZÄH ET AL. 2004

Zaeh, M. F.; Sudhoff, W.; Möller, N.; Aull, F.: Evaluation of mobile production scenarios based on the real option approach. Chemnitz: 2004.

ZEW 2009

Zentrum für europäische Wirtschaftsforschung: Die Bedeutung der Automobilindustrie für die deutsche Volkswirtschaft im europäischen Kontext. Hannover: 2009.

ZICKERT 2009

Zickert, G.: Elektrokonstruktion. 2. Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verlag 2009.

ZIMMERMANN 1980

Zimmermann, H.: OSI Reference Model - The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection. IEEE Transactions on Communications 28 (1980) 4, S. 425-433.

ZURAWSKI 2005

Zurawski, R.: The industrial information technology handbook. Boca Raton: CRC Press 2005.

### **10 Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten**

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) in den Jahren 2007 bis 2012 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors, die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen Arbeiten wurden verschiedene Fragestellungen zur Rekombination von Anlagentechnik untersucht, deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Schabert, Alexander: Analyse von Integrationsprozessen im automobilen Karosseriebau und deren Optimierung. Semesterarbeit (Nr. 2010/36). Bearbeitungszeitraum: 1.4.2010 – 31.7.2010

Paucker, Tobias: Entwicklung einer Datenbank für die Verwaltung von Integrationslösungen in der Automatisierungstechnik. Bachelorarbeit (Nr. 2011/32). Bearbeitungszeitraum: 1.5.2011 – 30.9.2011

Helbig, Tobias: Entwicklung einer Integrationslösung für Anlagentechnik im automobilen Karosseriebau. Semesterarbeit (Nr. 2011/103). Bearbeitungszeitraum: 1.9.2011 – 31.12.2011