

# **Abschlussbericht**

## **Modulare Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen**

Dieses Vorhaben (Projekt-Nr. 14021N) ist aus Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert und im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik e.V., Bremen, durchgeführt worden.

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner (Herausgeber)**

**Dr.-Ing. Michael Wilke**

**Dr.-Ing. Markus Heinecker**

fml Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstraße 15

D-85748 Garching bei München



Lehrstuhl fml

14021 N / 7

---

Name der Forschungsstelle(n)

---

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.03.2004 bis 28.02.2006

---

Bewilligungszeitraum

**Schlussbericht für den Zeitraum: 01.03.2004 bis 28.02.2006**

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema:

Entwicklung, modular aufgebauter, skalierbar automatisierter Materialflusssysteme für flexible, wandelbare Fabrikstrukturen für den innerbetrieblichen Behältertransport

Garching, 31.05.2006

---

Ort, Datum

---

Unterschrift



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Wissenschaftlich - technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	1
1.2	Stand der Forschung.....	3
<b>2</b>	<b>Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg</b> .....	<b>7</b>
2.1	Angestrebte Forschungsergebnisse.....	7
2.2	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse .....	9
<b>3</b>	<b>Materialflusssysteme</b> .....	<b>11</b>
3.1	Materialflusssysteme – Einteilung und Eigenschaften .....	11
3.1.1	Physische Materialflussebenen .....	12
3.1.2	Funktionen eines Materialflusssystems .....	13
3.1.2.1	Funktion Fördern .....	14
3.1.2.2	Funktion Lagern.....	20
3.1.2.3	Funktion Handhaben .....	22
3.1.3	Planung von Materialflusssystemen .....	24
<b>4</b>	<b>Wandelbare Materialflusssysteme</b> .....	<b>29</b>
4.1	Allgemeine Anforderungen an wandelbare Fabrikstrukturen .....	29
4.1.1	Flexibilität.....	29
4.1.2	Wandlungsfähigkeit und Wandelbarkeit .....	33
4.1.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	36
4.2	Bewertung der Wandelbarkeit von Materialflusssystemen.....	40
4.2.1	Flexible Materialflusssysteme .....	40
4.2.2	Wandelbare Materialflusssysteme.....	47
4.3	Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen am Beispiel der Funktion „Transportieren“ .....	51
4.3.1	Layoutflexibilität .....	52
4.3.2	Durchsatzflexibilität.....	54

4.3.3	Fördergutflexibilität .....	58
4.3.4	Wandelbarkeitspotenzial .....	62
4.4	Zusammenfassung.....	69
<b>5</b>	<b>Modularisierungsmethodik .....</b>	<b>71</b>
5.1	Allgemeine Systemtheorie.....	71
5.2	Modulare Fabrikstrukturen .....	75
5.2.1	Allgemeine Moduldefinition.....	75
5.2.2	Ansätze zur Modularisierung von Fabrikstrukturen.....	77
5.3	Funktionsorientierte Modularisierung .....	85
5.3.1	Allgemeiner Ansatz.....	85
5.3.2	Hierarchieebenenmodell.....	88
5.3.3	Methodik der Modularisierung .....	92
5.3.3.1	Subsystem .....	92
5.3.3.2	Struktur der Technikmodule.....	94
5.4	Zusammenspiel Modularisierung und Wandelbarkeit .....	100
5.5	Modularisierung am Beispiel einer Elektrohängebahn/Hängekransystem .....	102
5.6	Zusammenfassung.....	108
<b>6</b>	<b>Standardisierte Modulbeschreibung .....</b>	<b>111</b>
6.1	Aufbau der Modulbeschreibung am Beispiel der Funktion „Transportieren“ .....	111
6.1.1	Modulbeschreibung für Technikmodule.....	112
6.1.2	Modulschnittstelle .....	120
6.1.2.1	Mechanische Ebene der Modulschnittstelle.....	120
6.1.2.2	Steuerungstechnische Ebene der Modulschnittstelle .....	122
6.1.2.3	Energetische Ebene der Modulschnittstelle .....	129
6.1.3	Modulbeschreibung für Subsysteme .....	129
6.2	Datensprache der Modulbeschreibung .....	139
6.2.1.1	Datenkodierung: XML .....	139
6.2.1.2	Verarbeitung von XML-Dokumenten.....	143
6.2.1.3	Anwendungsbeispiel .....	146
6.3	Zusammenfassung.....	146
<b>7</b>	<b>Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>149</b>

7.1	Kundenindividuelle Produktion von Konsumgütern.....	149
7.2	Produktion elektronischer Bauteile.....	154
7.2.1	Modularisierung der Produktionsstruktur .....	155
7.2.2	Planung des Materialflusses.....	165
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>169</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>173</b>





# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Planungshorizonte der Fabrikstrukturen .....	1
Abbildung 1-2: Reduzierung des Automatisierungsgrades [VDI-01] .....	2
Abbildung 1-3: Versuchsanlage des Lehrstuhls fml .....	5
Abbildung 2-1: Fabriklayout 2020 [Mau-01] .....	9
Abbildung 3-1: Begriffsabgrenzungen in der Logistik [Gün-06b].....	11
Abbildung 3-2: Ordnungssystem des Materialflusses (nach [Ble-99]).....	13
Abbildung 3-3: Funktionen des Materialflusssystems .....	14
Abbildung 3-4: Bestandteile eines Transportsystems (nach [Rei-05]) .....	15
Abbildung 3-5: Modulmaße für die Systeme ISO- und Euro-Palette.....	16
Abbildung 3-6: Einteilung der Transportmittel [Gün-06b] .....	19
Abbildung 3-7: Auswahlkriterien für Transportsysteme.....	20
Abbildung 3-8: Subsysteme des Lagers mit Auswahlkriterien (nach [Gün-06b]) .....	22
Abbildung 3-9: Teilfunktionen des Handhabens mit entsprechenden Elementarfunktionen [VDI-2860].....	23
Abbildung 4-1: Zusammenspiel Basisflexibilität und erweiterte Flexibilität .....	32
Abbildung 4-2: Ansatz zur Abschätzung der notwendigen Wandlungsfähigkeit [Rei- 00].....	34
Abbildung 4-3: Zusammenhang Wandlungsfähigkeit – Wandelbarkeit [Wes-00] .....	35
Abbildung 4-4: Zusammenspiel Flexibilität und Wandelbarkeit.....	36
Abbildung 4-5: Nutzen der Wandlungsfähigkeit.....	37
Abbildung 4-6: Kostenarten und –vergleich wandlungsfähiger Systeme (nach [Nyh- 04a]).....	39
Abbildung 4-7: Untergliederung der Flexibilitätsziele [Hal-99].....	41
Abbildung 4-8: Flexibilitätsanforderungen an Materialflusssysteme nach [Han-01]..	45
Abbildung 4-9: Darstellung der Flexibilität.....	46

Abbildung 4-10: Anpassung der Flexibilität durch Erweiterung.....	49
Abbildung 4-11: Anpassung der Flexibilität durch Integrationsfähigkeit.....	50
Abbildung 4-12: Vergleich Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit in Bezug auf Erhöhung der Fördergutflexibilität.....	51
Abbildung 4-13: Flächenmäßige Betrachtung der Layoutflexibilität.....	52
Abbildung 4-14: Höhenmäßige Betrachtung der Layoutflexibilität.....	53
Abbildung 4-15: Durchsatzflexibilität unter Berücksichtigung der Materialflussrichtung („Richtungsabhängigkeit“).....	55
Abbildung 4-16: Einteilung der Ladehilfsmittel nach Abmaße und Gewicht am Beispiel geschlossener Behälter.....	59
Abbildung 4-17: Kriterien bei der Bewertung der Flexibilität des Greifbildes.....	60
Abbildung 4-18: Ausführungsbeispiele für die Kategorisierung der Flexibilität des Greifbildes.....	61
Abbildung 4-19: Vorgehensweise bei der Potenzialabschätzung von wandelbaren Materialflusssystemen.....	63
Abbildung 4-20: Abschätzung des Wandelbarkeitspotenzials bei einer Rollenbahn und einer Elektrohängebahn.....	65
Abbildung 4-21: Graphische Darstellung des Wandelbarkeitspotenzials bei einer Rollenbahn und einer Elektrohängebahn.....	66
Abbildung 4-22: Graphische Darstellung des ermittelten Wandelbarkeitspotenzial für ausgewählte Transportmittel.....	68
Abbildung 5-1: Ein allgemeines System (nach [Rop-99]).....	71
Abbildung 5-2: Die Fabrik als hierarchisches System betrachtet (nach [Wie-05])....	72
Abbildung 5-3: Systemkonzepte (nach [Rop-99]).....	73
Abbildung 5-4: Zusammenspiel der Systemkonzepte (nach [Rop-99]).....	74
Abbildung 5-5: Arten von Systemveränderungen.....	75
Abbildung 5-6: Allgemeine Eigenschaften und Beschreibungsmerkmale eines Moduls [Hil-05].....	77
Abbildung 5-7: Hierarchie-Ebenenmodell einer modularen Fabrik (nach [Wie-05])..	80

---

Abbildung 5-8: Entstehung von Wandlungsbausteinen .....	83
Abbildung 5-9: Zusammenhang zwischen Modularität sowie physischer und funktionaler Abhängigkeit.....	86
Abbildung 5-10: Einordnung der Funktionen im Hierarchieebenenmodell eines Materialflusssystems.....	88
Abbildung 5-11: Vorgehensweise bei der Bildung von lokalen Kennwerten .....	89
Abbildung 5-12: Funktionsorientierte Modularisierung eines Materialflusssystems ..	93
Abbildung 5-13: Technikmodule der Funktion „Transportieren“ .....	98
Abbildung 5-14: Technikmodule der Funktion „Lagern“ .....	99
Abbildung 5-15: Technikmodule der Funktion „Handhaben“ .....	100
Abbildung 5-16: Möglichkeit einer Flexibilitätserhöhung durch modulare Materialflusssysteme .....	101
Abbildung 5-17: Versuchsanlage am Lehrstuhl fml.....	103
Abbildung 5-18: Transportmittel inkl. Lastaufnahmemittel .....	106
Abbildung 5-19: Ausführungsbeispiele von Übergabepätzen .....	108
Abbildung 6-1: Aufbau und Struktur der Modulbeschreibung für ein Technikmodul	112
Abbildung 6-2: Datenstruktur für den Überpunkt „Allgemeine Daten“ .....	113
Abbildung 6-3: Datenstruktur für den Überpunkt „Funktionsbeschreibung“ .....	114
Abbildung 6-4: Datenstruktur für den Überpunkt „Technische Daten“ .....	116
Abbildung 6-5: Datenstruktur für den Überpunkt „Flexibilität“ .....	117
Abbildung 6-6: Datenstruktur für den Überpunkt „Kosten“ .....	118
Abbildung 6-7: Datenstruktur für den Überpunkt „Status“ .....	119
Abbildung 6-8: Mechanische Ebene der Modulschnittstelle.....	121
Abbildung 6-9: Kommunikation zwischen zwei Module.....	123
Abbildung 6-10: Steuerungstechnische Ebene der Modulschnittstelle .....	125
Abbildung 6-11: Definition des Befehlssatzes.....	126
Abbildung 6-12: Alternative Kommunikationsparameter .....	128
Abbildung 6-13: Energetische Ebene der Modulschnittstelle.....	129

Abbildung 6-14: Datenstruktur der Beschreibung eines Subsystems .....	130
Abbildung 6-15: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Allgemeine Daten“ und „Funktion“ .....	131
Abbildung 6-16: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Standortdaten“ .....	132
Abbildung 6-17: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Technische Daten“ .....	132
Abbildung 6-18: Berechnungsvorschriften zur Bestimmung der Gesamtverfügbarkeit .....	133
Abbildung 6-19: Vorgehensweise bei der Bestimmung der Verfügbarkeit komplexer Systeme .....	134
Abbildung 6-20: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Flexibilität“ ..	135
Abbildung 6-21: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Kosten“ .....	136
Abbildung 6-22: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Status“ .....	137
Abbildung 6-23: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Bereichsschnittstelle“ .....	138
Abbildung 6-24: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Ressourcen“ .....	139
Abbildung 6-25: DOM-Tree eines XML-Dokuments.....	145
Abbildung 6-26: Ausführung einer Modulbeschreibung am Beispiel „Übergabepplatz“ unter Verwendung der Datensprache XML.....	146
Abbildung 7-1: Referenzszenario für ein wandelbares Materialflusssystem .....	150
Abbildung 7-2: Fördermittelübersicht: Eingrenzung und Vorauswahl geeigneter Materialflussmittel [Wil-06].....	151
Abbildung 7-3: Ist-Layout der Elektronikproduktion (EG).....	155
Abbildung 7-4: Ist-Layout der Elektronikproduktion (UG).....	156
Abbildung 7-5: Ist- Zustand der Bereichsgliederung.....	157
Abbildung 7-6: Gliederung Ebenen 3 bis 1 für Modul Vormontage.....	158
Abbildung 7-7: Organigramm Insel .....	158

Abbildung 7-8: Erweiterungsvariante 1 .....	159
Abbildung 7-9:Erweiterungsvariante 2 .....	159
Abbildung 7-10: Bildung von Materialflussbereichen im Bereich der Handbestückung .....	161
Abbildung 7-11: Darstellung des Gruppenmodule-Pools .....	162
Abbildung 7-12: Fertigungsinseln.....	163
Abbildung 7-13: Fertigungsgruppen als Gruppenmodule .....	164
Abbildung 7-14: Hauptrichtung des Materialflusses .....	166
Abbildung 7-15:Materialflusstechnische Verkettung der Produktionsbereiche .....	167



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Einteilung der Ladehilfsmittel nach Tragfähigkeit.....	17
Tabelle 3-2: Überblick über die bei einer Ist-Analyse zu berücksichtigen Daten .....	27
Tabelle 4-1: Kostenarten bei wandlungsfähigen Systemen .....	38
Tabelle 4-2: Einfluss der Fördermittel auf die Flexibilität .....	43
Tabelle 4-3: Einfluss der Lagertechnik auf die Flexibilität .....	43
Tabelle 4-4: Einfluss der Lagerbediengeräte auf die Flexibilität .....	44
Tabelle 4-5: Anforderungen an ein flexibles Materialflusssystem .....	46
Tabelle 4-6: Kategorisierung wichtiger Transportmittel hinsichtlich Layoutflexibilität	54
Tabelle 4-7: Kategorisierung wichtiger Transportmittel hinsichtlich „Richtungsabhängigkeit“ .....	56
Tabelle 4-8: Kriterien zur Erhöhung der Durchsatzflexibilität .....	57
Tabelle 4-9: Anforderungen an wandelbare Materialflusssysteme am Beispiel Transportieren mit Einfluss auf die Flexibilitätsarten.....	64
Tabelle 4-10: Wandelbarkeitspotenzial für ausgewählte Transportmittel.....	67
Tabelle 5-1: Gestaltungsbereiche mit den entsprechenden Fabrikelementen einer modulare Fabrikstruktur (nach [Wie-03b]) .....	79
Tabelle 5-2: Wandlungsbefähiger (nach [Her-03]).....	82
Tabelle 5-3: Kriterien für eine funktionsorientierte Modularisierung .....	87
Tabelle 5-4: Übersicht über wichtige lokale Kennwerte in Bezug auf die Funktion „Transportieren“ .....	91
Tabelle 5-5: Charakteristik und Eigenschaften eines Subsystems .....	94
Tabelle 5-6: Charakteristik und Eigenschaften eines Technikmoduls.....	97
Tabelle 5-7: Einfluss der Technikmodule der Funktion „Transportieren“ auf die Flexibilitätsarten Layout, Durchsatz und Fördergut.....	102
Tabelle 5-8: Technikmodule für das Subsystem Elektrohängebahn.....	104
Tabelle 5-9: Technikmodule für das Subsystem Hängekransystem .....	105

Tabelle 5-10: Eigenschaften des Technikmoduls Übergabepplatz.....	107
Tabelle 6-1: Zusammenhang Technikmodul und Flexibilitätsart.....	117



# 1 Einleitung

## 1.1 Wissenschaftlich - technische und wirtschaftliche Problemstellung

“Fabrikplanung bewegt sich” lautet ein Kommentar in den VDI-Nachrichten [Sch-01]. Tatsächlich steht die Fabrikplanung vor der großen Herausforderung, auf Veränderungen der Marktsituation zu reagieren. Zunehmende Verkürzungen der Produktlebenszyklen in Verbindung mit einem hohen Innovationsdruck im Bereich der Produktionstechnologien, der Trend zur Fertigung kundenindividueller Produkte und damit gekoppelt eine hohe Variantenvielfalt erfordern eine schnelle und effiziente Anpassung der physischen Logistiksysteme hinsichtlich Größe, Funktion und Strukturen auf veränderte Rahmenbedingungen.

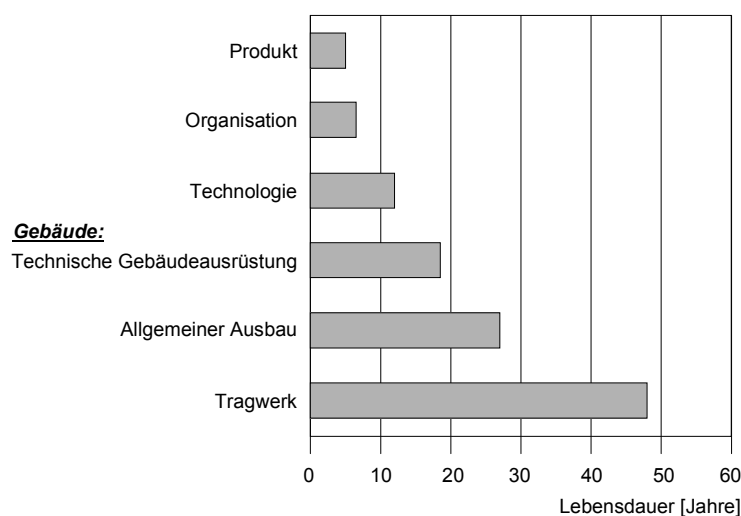


Abbildung 1-1: Planungshorizonte der Fabrikstrukturen

Demgegenüber stehen langfristige Planungs- und Finanzierungshorizonte für Gebäude und technische Einrichtungen (vgl. Abbildung 1-1). Der klassische Planungsansatz – Auslegung einer Fabrik (Gebäude, technische Einrichtungen, usw.) für ein großteils konstantes Produkt- und Produktionsspektrum, sowie ein Planungshorizont von max. 5 bis 10 Jahren – ist für die genannten Veränderungen der Marktsituation in vielen Fällen nicht mehr anwendbar.

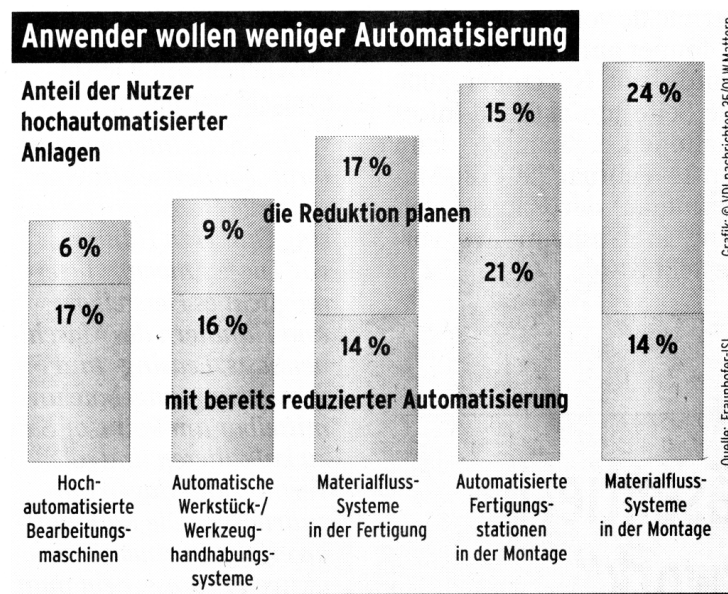


Abbildung 1-2: Reduzierung des Automatisierungsgrades [VDI-01]

Darüber hinaus sehen immer weniger Firmen in hochautomatisierten Produktionseinrichtungen einen wirtschaftlichen Nutzen (vgl. Abbildung 1-2). Aufgrund kleiner werdender Seriengrößen und unzureichender Flexibilität bei den Kapazitäten lassen sich Anlagen nicht mehr wirtschaftlich auslasten [VDI-01]. Besonders bemerkbar macht sich dieser Umstand bei Materialflusssystemen in der Montage, was die in Abbildung 1-2 dargestellte Umfrage unter 1000 Betrieben in der Investitionsgüterindustrie verdeutlicht. Die hochautomatisierten Anlagen, die in den vergangenen Jahrzehnten geplant worden sind, entsprechen nicht mehr im vollen Umfang den heute geforderten Flexibilitätsanforderungen.

Eine besonders hohe Anforderung an die Flexibilität materialflusstechnischer Anlagen stellt der Aspekt der kundenindividuellen Produktion dar. Zukünftige Firmen, besonders in der Produktion von Kleinserien und Einzelstücken, müssen in der Lage sein, kundenindividuelle Güter zu produzieren und zwar mit einer der heutigen Serienproduktion annähernd gleichzusetzenden Wirtschaftlichkeit. Heute geht die Produktion in kleinen Losgrößen noch mit erheblichen Produktions- und Logistikkosten einher. Automatisierte Lösungen des Materialflusses rechnen sich erst bei größeren Serienproduktionen. Dazu sind die gegenwärtigen automatischen Materialflusssysteme zu unflexibel und ihre Komplexität ist bei aufwendigen Systemen nur schwer zu beherrschen. Ferner erfordert der Trend zur Mass Customization [Sche-99], [Pil-01]

und den immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen Materialflussstrukturen, die sich schnell auf die veränderten Bedingungen anpassen lassen.

Eine Verfolgung der individuellen Produktion bedarf also zukunftsweisender, automatisierter Ansätze in der Materialflusstechnik und Logistik, um die Kostenschere gegenüber der Serienfertigung zu verkleinern, wandelbare Materialflusssysteme zu generieren und gleichzeitig eine hohe Verfügbarkeit durch Reduzierung der Komplexität zu gewährleisten.

### **1.2 Stand der Forschung**

Die Thematik "flexible, wandelbare Fabrik" wird derzeit in vielen Forschungsvorhaben behandelt, die eine Reihe verschiedener Ansätze zur Flexibilisierung der Produktion diskutieren. In diesem Zusammenhang wurden Ansätze wie Segmentierung [Wil-88], die Fraktale Fabrik [War-95] und holonische Fabrik [vaB-00] genannt, die aber alle das Ziel verfolgen, eine höhere Flexibilität auf der Ebene der Fabrikorganisation zu erreichen, jedoch nicht die Ebene des physischen Materialflusses betrachten. Im Sonderforschungsbereich (SFB) 467 wird an „Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion“ [Wes-98] geforscht.

Weitere Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit der Thematik, in welche Richtung sich die Produktion in den nächsten Jahren bewegen wird und wie sich die Unternehmen in ihren Fabrikstrukturen wandeln müssen [Wir-01a], [Wir-01b]. Diese stark auf Visionen bauenden Forschungsvorhaben diskutieren Anforderungen an zukünftige Fabrikstrukturen und geben Empfehlungen für zukünftige Forschungsvorhaben. Dabei ist eine Forderung die Gestaltung modular aufgebauter Fabrikstrukturen, um die notwendige Flexibilität zu erreichen. Auch in [Sche-00], [Sche-01], [Gol-99] und [Kar-98] werden zunehmend Wandlungsfähigkeit und Fähigkeit für die gesamte logistische Kette gefordert und zwar von der Fördertechnik über die Lagertechnik bis hin zu Sortier- und Kommissioniersystemen und der Schnittstelle zur außerbetrieblichen Logistik. In anderen Produktionsbereichen werden ähnliche Ansätze verfolgt und beispielsweise für moderne Montageanlagen Adaptierbarkeit und mobile Gestaltung gefordert [Wie-00b].

Auf der Ebene des Materialflusses beschränkten sich die Forschungsvorhaben auf den Einsatz spezieller Materialflusstechnik (z.B. FTS [Kar-98], Flurfreie Hängebahn-

systeme [Ert-99]) in flexiblen Fabrikstrukturen, die jedoch nur für bestimmte Anwendungsfälle die Anforderungen der Flexibilität erfüllen und somit nur als Teillösungen in modularen Materialflusssystemen gesehen werden können. Darüber hinaus wurden speziell auf Produkte zugeschnittene Lösungen flexibler Materialflusssysteme entwickelt [Bau-02], [Rei-01], [Wit-01]. Auf eine gesamtheitliche Verknüpfung der verschiedensten technischen Materialflusskomponenten zur Schaffung modularer Materialflusssysteme und die Ausarbeitung von Konzepten, die auf verschiedene Branchen und Anwendungsfälle übertragen werden können, wird dabei nicht eingegangen.

Im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „MATVAR“ wurden am Lehrstuhl fml Materialflusssysteme für variable Fertigungssegmente im dynamischen Produktionsumfeld entwickelt [Gün-00], [Gün-97]. Im Zentrum der Betrachtung standen dezentrale Fertigungsstrukturen, die wegen ihres dynamischen Umfeldes leicht an sich ändernden Anforderungen angepasst werden können. Der Lehrstuhl fml übernahm u.a. die Untersuchung, Konzeption, Bewertung und Erprobung flurfreier Materialflusstechnik und deren Schnittstellen zur Fertigung [Bam-00], [Gün-98a], [Gün-98b]. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine Flächen für den Materialtransport verbrauchen und Quellen-Senkenbeziehungen mit geringem Aufwand flexibel geändert werden können. Als Ergebnis entstand eine Versuchsanlage für ein Hängekran-/Hängebahnsystem für den innerbetrieblichen Behältertransport (vgl. Abbildung 1-3), in der auch die in diesem Forschungsprojekt entwickelten Modularisierungsansätze prototypenhaft umgesetzt werden sollen.

Als Vertiefung der Thematik „Flexible Produktionsstrukturen“ erarbeitete der Lehrstuhl fml im Sonderforschungsbereich SFB 582 „Marktnahe Produktion individualisierter Güter“ am Entwurf der innerbetrieblichen Logistik für Minifabriken. Eine Verfolgung der individuellen Produktion bedarf zukunftsweisender, automatisierter Ansätze in der Logistik, um die Kostenschere gegenüber der Serienfertigung zu verkleinern. Hierzu wurden autonome, dezentrale Materialflussmittel entwickelt, die hinsichtlich Einsatz, Umfang, Automatisierung und Konfiguration flexibel sind. Der Schwerpunkt lag vor allem auf der Entwicklung zukünftiger Geräte- und Materialflussteuerungen [Gün-03a], [Gün-03b].

Im Rahmen des Projektes „LogiMont“, das in das BMBF-Verbundprojekt „Innomont“ eingegliedert war, analysierte der Lehrstuhl fml die logistischen Einflüsse bei flexib-

len Montage- und Materialflusskonzepten im Backend-Bereich der Chipfertigung. Dabei wurde mit dem Planungswerkzeug LogiFACT ein Konzept entwickelt, das es dem Planer ermöglicht, flexibel Strategien zu definieren. Für die Bewertung ist ein Verfahren entwickelt worden, um Flexibilitätsziele bei der Planung von Materialflusssystemen als Entscheidungskriterien berücksichtigen zu können [Hal-99].

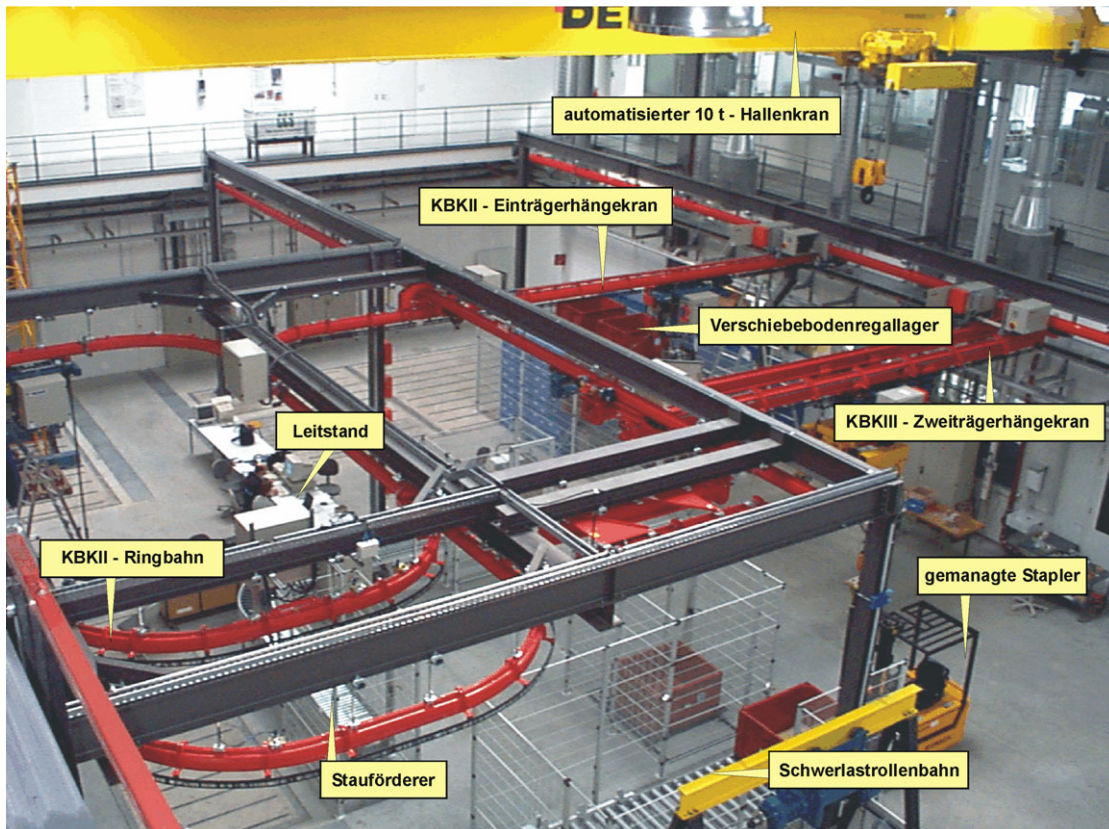


Abbildung 1-3: Versuchsanlage des Lehrstuhls fml



## **2 Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg**

### **2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse**

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Entwicklung einer Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme. Wandelbare Materialflusssysteme müssen dabei die Eigenschaft aufweisen, auf ungeplante und nicht vorge dachte Ereignisse zu reagieren oder mit geringem Aufwand an die neuen Anforderungen angepasst werden zu können.

Eine mögliche Methode für die Gestaltung wandelbarer Materialflusssysteme stellt die Modularisierung dar. Mit einem Modularisierungsansatz werden zwei große Ziele verfolgt. In der Planungsphase kann das Materialflusssystem genau nach den Anforderungen hinsichtlich dessen technischer Daten geplant und ausgelegt werden. Die Bewertung und Auslegung erfolgt dabei anhand der Flexibilität, d.h. in der Zukunft vorgeplanter und vorgedachter Ereignisse. Da sich die Unternehmen in einem zunehmend turbulenten Umfeld befinden und auch auf ungeplante Ereignisse reagieren müssen, bedarf es wandelbarer Materialflusssysteme. Hier zeigt sich der zweite Nutzen von modular aufgebauten Systemen. Modulare Materialflusssysteme können gezielt durch neue Module erweitert und ergänzt werden, um somit den neuen Anforderungen zu entsprechen.

Ein Modul verfügt über eine mechanische, eine elektrische und eine informationstechnische Schnittstelle. Über die mechanische Schnittstelle werden die Behälter physikalisch mittels entsprechender Materialflusstechnik an andere Module weitergegeben. Die Stromversorgung und die physikalische Datenübertragung finden über die elektrische Schnittstelle statt. Damit das Modul mit weiteren Modulen des Gesamtsystems wie auch mit dem menschlichen Bediener kommunizieren kann, verfügt es über eine informationstechnische Schnittstelle. Diese drei Schnittstellen bilden zusammengefasst die mechatronische Schnittstelle des Moduls.

Um eine Wandelbarkeit des Gesamtsystems, in dem Module entfernt, bzw. verändert werden können, zu erreichen, muss die mechatronische Schnittstelle des Moduls standardisiert sein. Hierfür sollen die Anforderungen und Aufgaben der Schnittstelle hinsichtlich Mechanik, Elektrik und Steuerungstechnik analysiert und beschrie-

ben werden. An die mechanische Seite der Schnittstelle werden Anforderungen wie die Kompatibilität zu standardisierten Behältertypen gestellt. Die informationstechnische Schnittstelle muss nicht nur eine durchgängige Kommunikation zu anderen Modulen, sondern auch zu PPS und ERP-Systemen gewährleisten. Da die materialflusstechnischen Module skalierbar automatisiert sind, muss ferner die Kommunikation zwischen unterschiedlich automatisierten bzw. unterschiedlich intelligenten Modulen und zusätzlich mit dem Menschen möglich sein. Die Verwendung von mechatronischen Schnittstellen führt automatisch zu einer Kopplung von Informationsfluss und Materialfluss, was wiederum eine hohe Transparenz der Prozesse und somit eine geringe Fehlerhäufigkeit ergibt. Neben der Analyse und der Beschreibung der mechatronischen Modulschnittstellen soll auch der Aufbau des intermodularen Materialflusses aufgezeigt werden.

Da die Gestaltung und Größe eines Moduls von dessen Funktionsumfang und Aufgabe abhängt, ist u.U. auch innerhalb eines Moduls ein Materialfluss nötig. Dieser innermodulare Materialfluss soll untersucht und gestaltet werden, damit er sich ohne Systemsprünge in den intermodularen Materialfluss eingliedern lässt. Beim Zusammenfügen der einzelnen Module wird der innermodulare Materialfluss eines Moduls über die materialflusstechnische, mechatronische Schnittstelle mit dem innermodularen Materialfluss anderer Module gekoppelt. So entsteht das gesamte Materialflusssystem. Sollte es z.B. aus räumlichen Gegebenheiten nicht möglich sein, die Module direkt zusammenzufügen, sollen materialflusstechnische Module zum Einsatz kommen, deren Schnittstellen genauso aufgebaut und standardisiert sind.

Der Einsatz eines modular aufgebauten Materialflusssystem mit standardisierten Schnittstellen im Bereich des physikalischen und informationstechnischen Materialflusses bietet die Voraussetzungen für ein kostengünstiges, effektives und zuverlässiges Materialflusssystem. Zum einen lassen sich die Inbetriebnahmezeiten der Module bzw. des Gesamtsystems verkürzen, da jedes Modul eine für sich abgeschlossene Funktionseinheit darstellt und somit unabhängig getestet und in Betrieb genommen werden kann. Dies ermöglicht auch eine einfachere Wartung der Module bzw. des Systems. Zum anderen sollen die Module skalierbar automatisiert sein, um den optimalen Automatisierungsgrad für die entsprechenden Bedürfnisse zu haben. Die Verwendung skalierbar automatisierter Module erlaubt dem Fabrikbetreiber, sich sein System aus den Komponenten verschiedener Hersteller zusammenzustellen. Ferner sind Geschäftsformen wie das Leasen einzelner Module denkbar.



Als wissenschaftlich-technische Ergebnisse sollen die Module nach Art und Ausprägung definiert werden. Außerdem soll der innermodulare und intermodulare Materialfluss aufgezeigt werden. Um eine durchgängige Kopplung von Materialfluss und Informationsfluss und die Interoperabilität der Module zu gewährleisten, wird der Aufbau der mechatronischen Schnittstellen beschrieben.

### 2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Der Forschungsantrag vermittelt konkret Gestaltungshinweise über den Aufbau und die materialflusstechnische Gestaltung der „Fabrik der Zukunft“. Diese Fabrik wird in der Lage sein, die steigenden Anforderungen an die innerbetriebliche Materialflusstechnik und Logistik, bedingt z.B. durch Mass Customization, zu erfüllen. Studien gehen davon aus, dass die Montage von Automobilen in Zukunft am besten in einem Ring zu realisieren ist (vgl. Abbildung 2-1), an dem Zulieferer sich mit einzelnen Modulen flexibel anknüpfen lassen [Boe-02], [Mau-01]. Da die Zulieferer meist kmUs sind, zeigt sich auch hier, welche Vorteile sich dem Betreiber bieten, wenn er seine Fabrik durchgängig modular aufbaut und deren Module über standardisierte materialflusstechnische Schnittstellen verfügt.

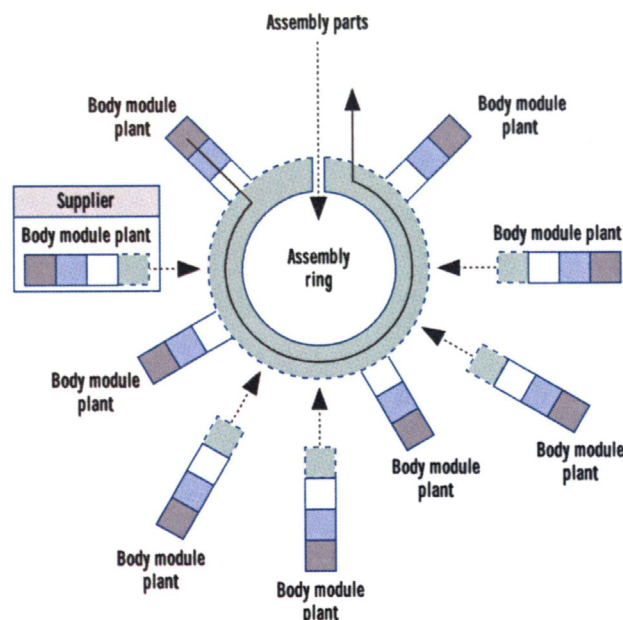


Abbildung 2-1: Fabriklayout 2020 [Mau-01]

Für die Konzeption der mechatronischen Schnittstelle kommen das Konzept und die Idee der verteilten, dezentralen Automatisierung (iDA-Technologieplattform) in Frage [Buc-01]. Dieses Konzept gehört auf seine Tauglichkeit für Materialflusssysteme überprüft und entsprechend erweitert bzw. verfeinert.

Die detaillierte Beschreibung und die Standardisierung der Modulschnittstellen ermöglicht die schnelle und leichte Abbildung logistischer Prozesse. Diese Ergebnisse sind eine Voraussetzung für den Aufbau der „Digitalen Fabrik“ und lassen somit schon bei der Planung bzw. späteren Umplanung der Fabrik erhebliche Einsparungspotenziale erzielen. Ziel ist es dabei alle Daten, die während des Lebenszyklus eines Technikmoduls benötigt werden (Planung, Wartung, Steuerung etc.), in einer Beschreibung zusammenzuführen und diese in einer Datenbank abzulegen. Auf dieser Datenbasis können dann jederzeit alle erforderlichen Informationen abgerufen und redundante Datenhaltung vermieden werden.

# 3 Materialflusssysteme

## 3.1 Materialflusssysteme – Einteilung und Eigenschaften

Die Gestaltung des Materialflusses und dessen Informationsfluss ist Gegenstand der Logistik. Sie hat dabei das Ziel, die richtigen Güter in der richtigen Menge und Qualität zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Bedarfsort zu minimalen Kosten zur Verfügung zu stellen. Die Logistik versteht sich zunehmend als wichtige Querschnittsfunktion im produzierenden Umfeld und deckt die gesamte Kette von der Beschaffung beim Lieferanten über den unternehmensinternen Materialtransport bis zur Distribution an den Kunden ab (vgl. Abbildung 3-1).

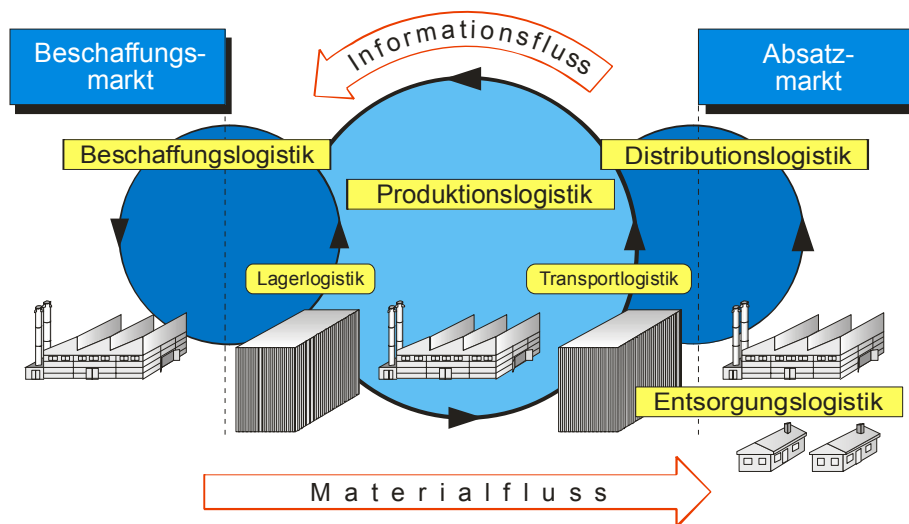


Abbildung 3-1: Begriffsabgrenzungen in der Logistik [Gün-06b]

Im Zusammenhang mit e-Commerce und Supply Chain Management sind in jüngster Vergangenheit vor allem die Beschaffungs- und Distributionslogistik in aller Munde. Auch die Lagerlogistik und die angrenzenden Kommissioniersysteme sind von großen Veränderungen betroffen. Für den Bereich der Transportlogistik werden mit Nachdruck unterstützende Informationssysteme entwickelt, die eine Optimierung der organisatorischen Abwicklung ermöglichen. Infolge von gesetzlichen Bestimmungen kommt der Entsorgungslogistik eine immer wichtigere Bedeutung zu, da das ganze Logistiksystem als ein Kreislauf von Waren, Informationen angesehen wird und somit nicht mehr bei der Warenabnahme durch den Endkunden endet.

In der vorliegenden Arbeit wird ausgehend von den Veränderungen in wandelbaren Produktionsstrukturen im Weiteren nur noch die Produktionslogistik betrachtet. Die Produktionslogistik umfasst die Planung, Steuerung und Überwachung der in den Unternehmen anfallenden Material- und Informationsflüsse vom Rohmaterial über die unterschiedlichen Stufen des Produktionsprozesses bis hin zum fertigen Produkt. Der Materialfluss ist dabei definiert als die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- oder Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Materialflussebenen [VDI-2411]. Sowohl der physische Materialfluss als auch dessen Informationssysteme werden in verschiedene Ebenen gegliedert.

#### **3.1.1 Physische Materialflussebenen**

Der physische Materialfluss kann in folgende 4 Stufen hierarchisch kategorisiert werden (vgl. Abbildung 3-2) [Bul-94], [Ble-99]:

1. Externer Transport und Verkehr (überregionale, regionale und lokale Ebene):  
Transporte zwischen verschiedenen Produktionsstandorten des Unternehmens oder zwischen dem Unternehmen und seinen Zulieferern oder Kunden. Diese Stufe ist den Materialflüssen der Beschaffungs-, Distributions- und Entsorgungslogistik zuzuschreiben und kennzeichnet den überbetrieblichen Materialfluss.
2. Betriebsinterner Materialfluss:  
Transporte innerhalb eines Werksgeländes zwischen den verschiedenen Bereichen oder Werksgebäuden des Betriebes.
3. Gebäudeinterner Materialfluss:  
Transporte innerhalb eines Werksgebäudes zwischen Abteilungen oder Maschinen- und Arbeitsplatzgruppen verschiedener Bereiche und Transporte zwischen einzelnen Betriebsmitteln oder Arbeitsplätzen. Bedingt durch die Produkteigenschaften und die in einem Betrieb vorliegende Fertigungstiefe kann sich der gebäudeinterne Materialfluss auch in mehrere Ebene gliedern
4. Materialfluss am Arbeitsplatz:  
Versorgung mit Material und Handhabung am Arbeitsplatz.

Die Stufen 2 bis 4 umfassen alle Bewegungen innerhalb eines Werkes und werden daher als innerbetrieblicher Materialfluss bezeichnet.

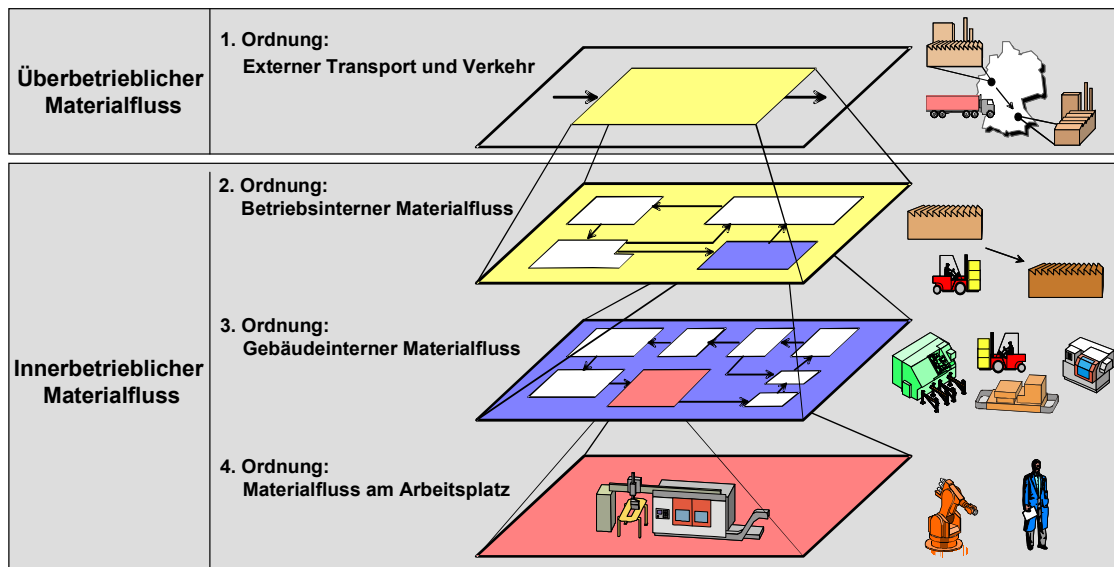


Abbildung 3-2: Ordnungssystem des Materialflusses (nach [Ble-99])

Betrachtungsgegenstand in der vorliegenden Arbeit ist der gebäudeinterne Materialfluss (Stufe 3). Gerade die Wandelbarkeit verketteter Betriebsbereiche, Arbeitsplatzgruppen oder Betriebsmittel ist maßgebend für Strukturen in einer flexiblen Produktion, da sich die Veränderungen innerhalb des Produktionssystems, hervorgerufen z.B. durch neue Produktionstechnologien oder neu eingeführte Produkte, meist direkt auf das Materialflusssystem auswirken und geeignete Reaktionen erfordern.

#### 3.1.2 Funktionen eines Materialflusssystemes

Nach der [VDI-2411] werden folgende Funktionen zu einem Materialflusssystem gezählt: Bearbeiten, Prüfen, Handhaben, Fördern, Lagern und Aufenthalt. Die Richtlinie [VDI-2860], die als Teilfunktionen des Materialflusses nur Fördern, Lagern und Handhaben nennt, definiert und systematisiert die Handhabung aus einem Katalog an Elementar- und zusammengesetzten Funktionen: Speichern, Mengen verändern, Sichern und Kontrollieren. Neben den in den beiden VDI-Richtlinien genannten Funktionen zählt man heute ebenfalls zum Materialfluss die Funktionen Montieren, Umschlagen, Kommissionieren, Palettieren und Verpacken.

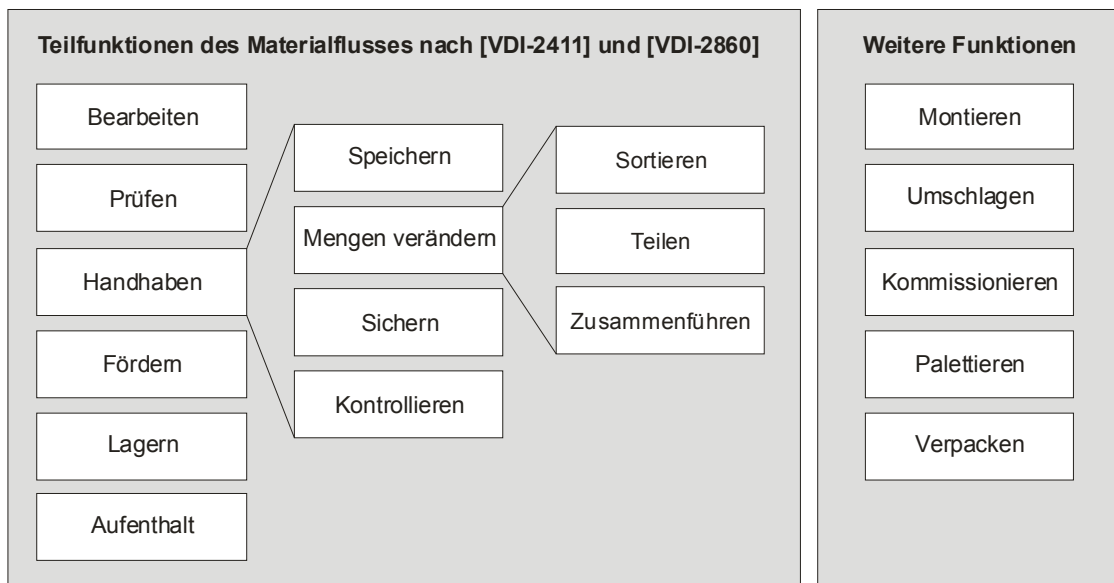


Abbildung 3-3: Funktionen des Materialflusssystemes

Die Hauptfunktionen des Materialflusses sind Fördern, Lagern und Handhaben, die auch den Fokus der weiteren Betrachtungen dieser Arbeit bilden [Jün-89]. Alle weiteren in Abbildung 3-3 dargestellten Funktionen eines Materialflusssystemes lassen sich in der Regel aus den drei genannten Hauptfunktionen zusammensetzen.

#### 3.1.2.1 Funktion Fördern

Eine der wichtigsten Aufgaben innerhalb eines Materialflusssystemes ist das Fördern bzw. Transportieren. Ein Transportsystem lässt sich aus drei Komponenten aufbauen (vgl. Abbildung 3-4). Das zu transportierende Element und das Transportmittel, mit dem der Transport durchgeführt wird, bilden die physikalischen Bestandteile. Der Ablauf und die Steuerung werden durch den **Transportprozess** dargestellt. Diese einzelnen Subsysteme müssen sich gegenseitig ergänzen, um die Funktion des Transportierens bzw. Förderns gewährleisten zu können.

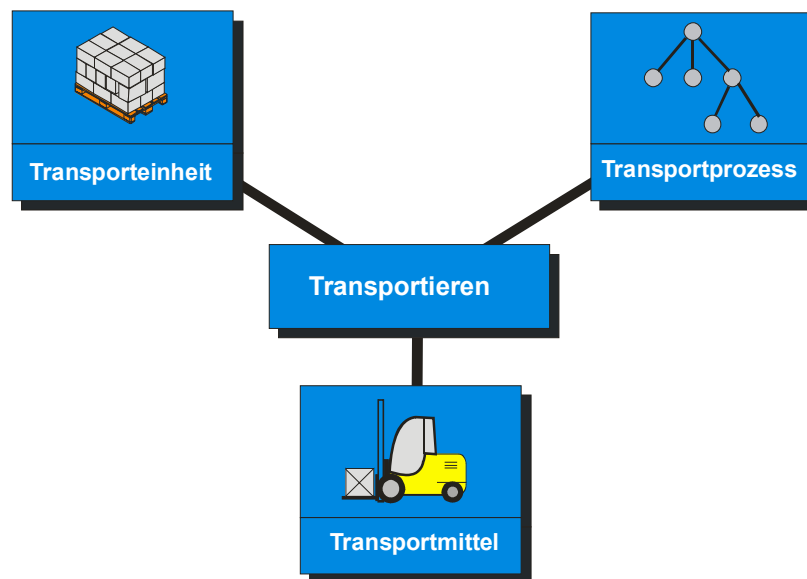


Abbildung 3-4: Bestandteile eines Transportsystems (nach [Rei-05])

Mit der Beschreibung der Transporteinheit beginnt idealerweise jedes Lastenheft für ein Materialflusssystem. Transporteinheiten werden gebildet, um die Transportfähigkeit beliebiger Güter herstellen zu können und durch Bildung uniformer logistischer Einheiten den Transport von Gütern zu erleichtern.

#### **Transporteinheit**

Die Transporteinheit bestimmt mit ihren Merkmalen die Gestaltung aller am im Materialflusssystem beteiligten Förder-, Handhabungs- und Lagereinrichtungen. Die Transporteinheit wird meist aus dem Beladungsgut an sich und einem Ladehilfsmittel gebildet, um einheitliche Bedingungen für den Materialfluss herzustellen. Die hohe Einsatzhäufigkeit von Ladehilfsmitteln lässt sich durch die Aufgaben begründen, die im Zusammenhang mit dem Materialfluss bewältigt werden müssen:

- Schutz vor äußeren Einflüssen
- Ladungssicherung
- Zusammenfassen mehrerer Transportgüter in einer Transporteinheit
- Einheitliche Greif-, Handhabungs- und Transportmöglichkeiten
- Identifikationsmöglichkeiten durch Auto-Ident

### 3 Materialflusssysteme

---

- Standort- oder unternehmensübergreifender Austausch durch standardisierte Ladehilfsmittel

Ist der Einsatz von Ladehilfsmittel auf den innerbetrieblichen Bereich beschränkt, so kann man von einem geschlossenen innerbetrieblichen Kreislauf sprechen. Im Automobilbereich wird dieser Austausch oft auf die Zulieferindustrie ausgedehnt, um ein Umpacken der Transportgüter zu vermeiden. In diesem Zusammenhang spricht man von einem Ladehilfsmittel-Pool, wenn mehrere Unternehmen Zugriff auf die umlaufenden Ladehilfsmittel haben.

Die Einhaltung von Standardmaßen ist eine Voraussetzung für den durchgängigen Einsatz von Ladehilfsmittel in der Transportkette und bei der Zusammenstellung von Gebinden. Die Einführung von Modulmaßen nach DIN 55510 ermöglicht eine flächenverlustfreie Bildung von Transporteinheiten durch verschiedenartige Ladehilfsmittel [DIN-55510]. Am Beispiel der Systeme ISO- und Europalette sind in Abbildung 3-5 die Modulmaße anhand der Bildung von Transporteinheiten dargestellt.

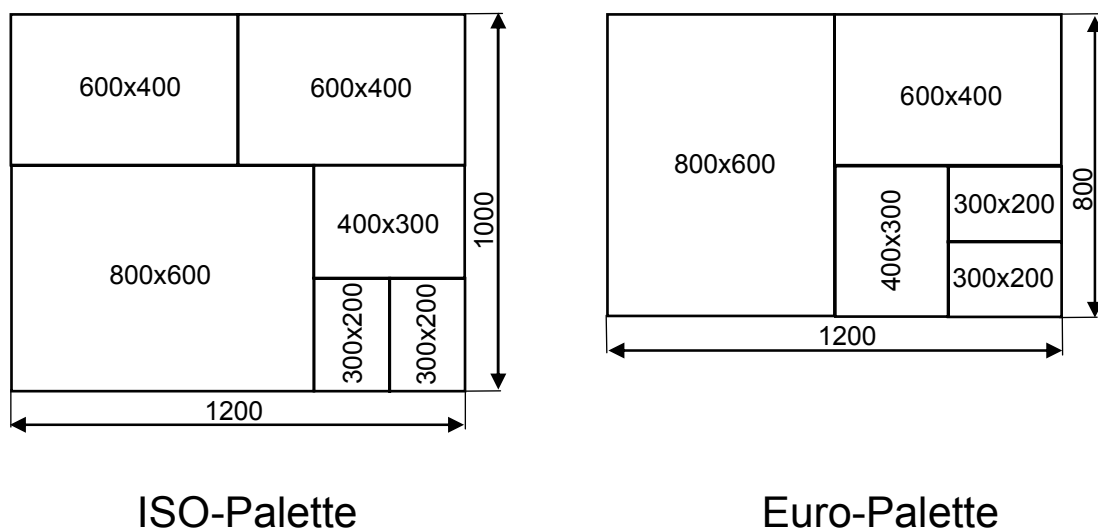


Abbildung 3-5: Modulmaße für die Systeme ISO- und Euro-Palette

Aufgrund der verschiedenen Anforderungen, die an Ladehilfsmittel gestellt werden, existiert eine große Variantenvielfalt. Eine Einteilungsmöglichkeit der Varianten stellt die Traglast dar, da mit zunehmender Behältergröße eine Tragfähigkeitssteigerung verbunden ist (vgl. Tabelle 3-1). Kleinladungsträger werden demnach bis 50 kg Trag-



### 3.1 Materialflusssysteme – Einteilung und Eigenschaften

fähigkeit und in einer maximalen Größe 600 x 400 mm, Großladungsträger bis zu 1 t Tragfähigkeit und einer maximalen Größe von 1200 x 1000 mm eingesetzt. Darüber hinaus lassen diese sich auch danach unterscheiden, ob die Ladung umschlossen wird (Behälter), oder ob diese nur als Träger für die Ladung dienen (Tablare und Paletten).

	Kleinladungsträger	Großladungsträger
Tragfähigkeit	Bis 50 kg	Bis 1000 kg
Flächengrundmaße (Außen)	800 x 600 mm 600 x 400 mm 400 x 300 mm 300 x 200 mm	1200 x 1000 mm 1200 x 800 mm 1000 x 800 mm 800 x 600 mm
Offene Ladungsträger	Tablare	Zwei- und Vierwege- Flachpaletten Rungenpaletten
Geschlossene Behälter	Kommissionierkästen Lagerbehälter Materialflussbehälter	Gitterboxen Paloxen

Tabelle 3-1: Einteilung der Ladehilfsmittel nach Tragfähigkeit

Zur Reduzierung einer hohen Anzahl der Ausführungsvarianten trägt die Einführung von Standardisierung und Normen bei. Gerade im Bereich der Ladehilfsmittel gibt es durch die Kombination der beschriebenen Merkmale eine Vielzahl an speziellen Ausführungen. Die erzeugte Variantenvielfalt erfordert stets viele Anpassungsmöglichkeiten in der Transportkette, sobald ein Behälter außerhalb seines speziellen Bereiches eingesetzt wird. Eine Standardisierung wirkt sich daher positiv auf die Durchgängigkeit für kompatible Behältersysteme im gesamten Materialflusssystem aus. Bei der Standardisierung spielen Industriezweige wie beispielsweise die Automobilindustrie eine bedeutende Rolle, da aufgrund der großen Abgabemengen die Bereitschaft zur Standardisierung groß ist.

Im Bereich der Ladehilfsmittel für Tragfähigkeiten bis zu 50 kg hat der VDA (Verband der deutschen Automobilindustrie) eine Normung in den Außenmaßen 600 x 400 mm, 400 x 300 mm und 300 x 200 mm vorgelegt, die anschließend in einer DIN-Norm umgesetzt wurden [DIN-30820]. Durch einheitliche Greifmöglichkeiten eignen sich solche Behältertypen u.a. zum manuellen und automatischen Handhaben und zum Einsatz in automatischen Kleinteilelagern. Die gewählten Außenmaße lassen ein verlustfreies Stapeln auf genormten Euro- und ISO-Flachpaletten der Maße 1200 x 800 mm bzw. 1200 x 1000 mm zu (vgl. Abbildung 3-5).

Durch die Ausrichtung der Großladungsträger auf den Transport mit Flurförderzeugen stehen normierte Greifmöglichkeiten zur Verfügung. Für die Lastaufnahme durch einen Stapler ist die Einfahrtshöhe zum Unterfahren durch die Gabel ein wichtiges Maß. Eine gute Orientierung liefert die Norm zu Vierwegefachpaletten [DIN-15146]. Die wohl bekannteste standardisierte Flachpalette im Bereich der Vierwegepaletten ist die Europalette [UIC 435-2]. Mit ihren Maßen von 1200 x 800 mm und einer Tragfähigkeit von bis zu 1500 kg ist sie die Basis vieler Transportvorgänge. Auf ihr werden Güter zu Ladeeinheiten für den Umschlag, den Transport und die Lagerung zusammengefasst. Eine davon abgewandelte Bauform ist die Gitterboxpalette, die oft für den innerbetrieblichen Teiletransport genutzt wird [DIN-15155].

#### **Transportmittel**

Transportmittel (Fördermittel) erfüllen allgemein die Funktion der innerbetrieblichen Raumüberbrückung von Gütern, d. h. deren horizontale und vertikale Ortsveränderung. Transportmittel werden grundsätzlich unterteilt nach stetiger Förderung bei kontinuierlichem Fördergutstrom sowie nach unstetiger Förderung bei intermittierendem Fördergutstrom. Dementsprechend können den Fördermitteln auch folgende charakteristische Eigenschaften zugeordnet werden: Hohe Leistungsfähigkeit bei Stetigförderern und in der Regel eine etwas höhere Flexibilität bei Unstetigförderern. Die weitere Einteilung der Stetigförderer nach dem physikalischen Wirkprinzip in mechanische, pneumatische und hydraulische Förderer bezieht sich auf den konstruktiven Aufbau bzw. auf die Übertragungsform der notwendigen Energie zum Vortrieb des Fördergutes.

### 3.1 Materialflusssysteme – Einteilung und Eigenschaften

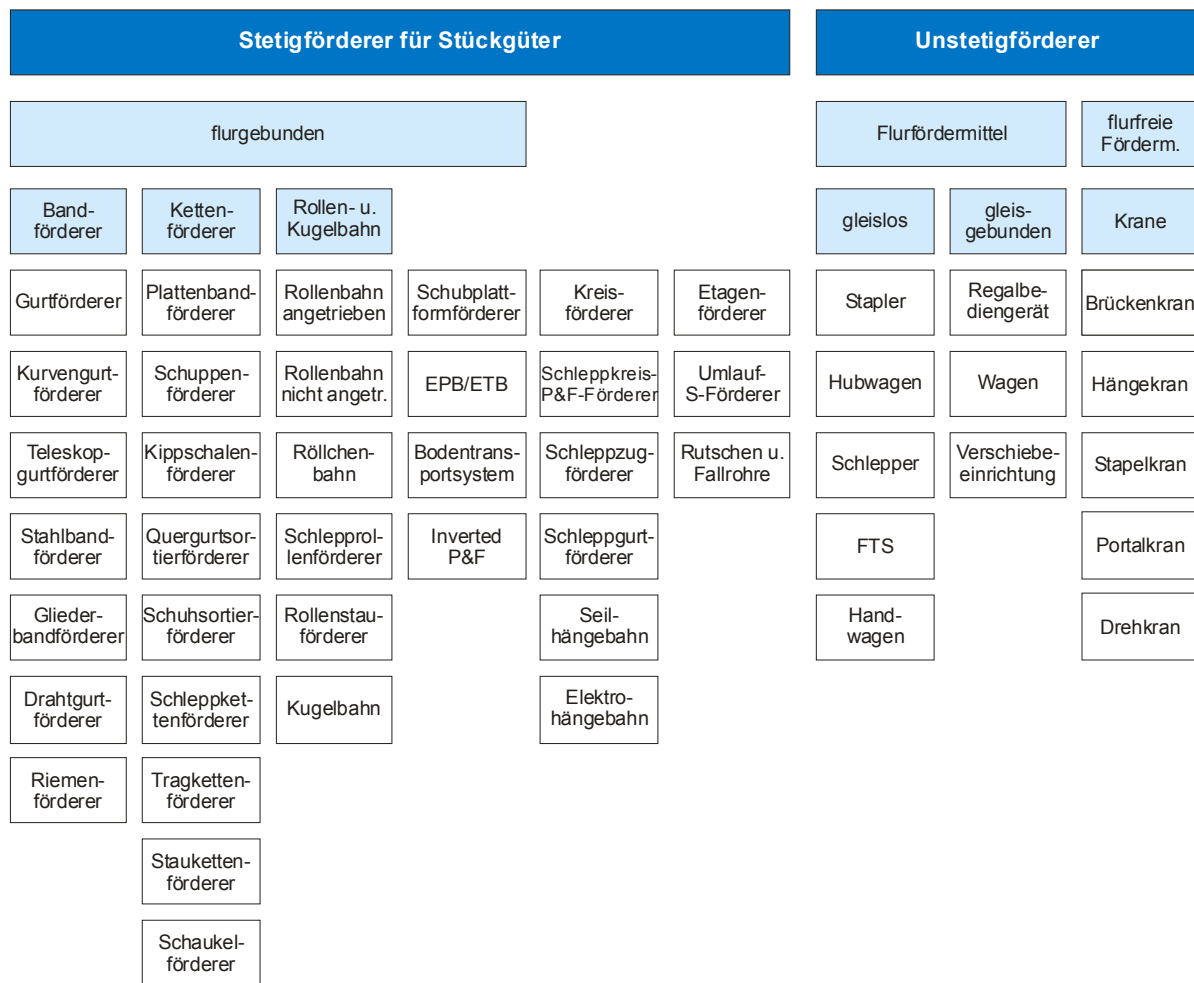


Abbildung 3-6: Einteilung der Transportmittel [Gün-06b]

Bei Unstetigförderern, die bis auf wenige Handfahrgeräte alle über einen mechanischen Antrieb verfügen, wird zwischen flurfreien und flurgebundenen Fördermitteln unterschieden. Unter dem Flexibilitätsaspekt ergibt sich bei den flurgebundenen Unstetigförderern eine Trennung in gleisgebundene und gleislose Flurförderer. Dabei kommen manuelle, mechanisierte und automatisierte Fördermittel zum Einsatz.

Im Rahmen der Planung von Transportsystemen gilt es, für eine konkrete Förderaufgabe anforderungsgerechte Fördermittel auszuwählen und diese möglichst optimal zu einem Fördersystem zusammenzufügen (vgl. Abbildung 3-7) [Gün-06b], [Rüt-00]. Dabei sind die Auswahlkriterien nach den Kenndaten des Fördervorganges wie z. B. Durchsatz und Förderart zu berücksichtigen. Weitere Punkte sind die Anforderungen des Förderortes wie Möglichkeiten der Energieversorgung und Umwelteinflüsse. So

sind z. B. im Lebensmittelbereich erhöhte Anforderungen an die Hygiene der Anlage zu stellen. Einen letzten Punkt stellen die Eigenschaften des Fördergutes, wie Größe und Gewicht, und Vorgaben des Anwenders dar.

Auswahlkriterien:

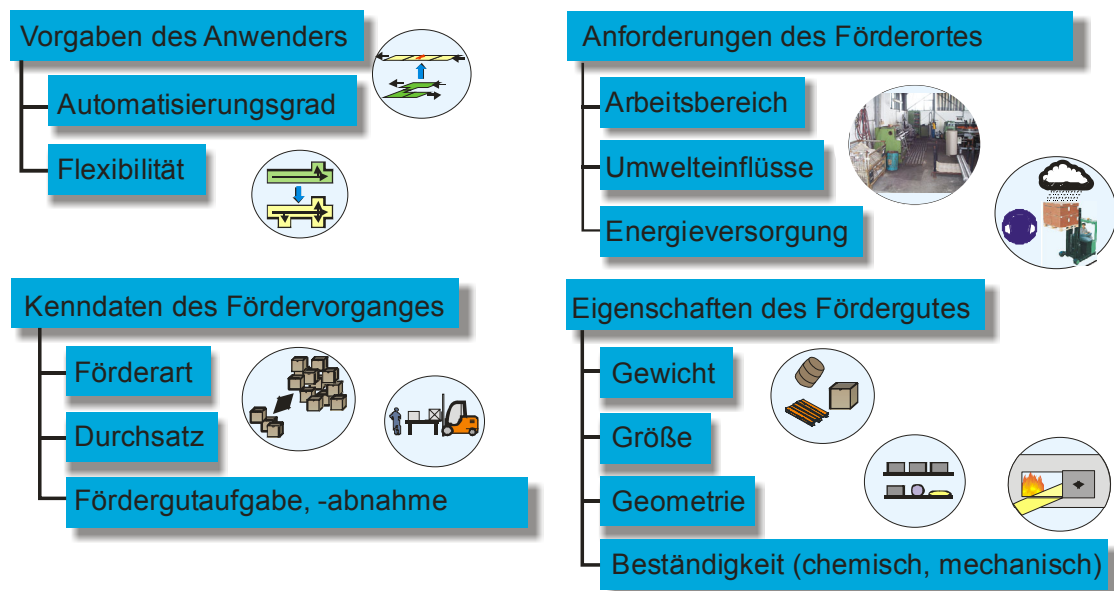


Abbildung 3-7: Auswahlkriterien für Transportsysteme

Die reine Transportaufgabe ist eine wesentliche Grundfunktion des Materialflusses. Sie ist am stärksten von Umstrukturierungen in der Produktion betroffen und deswegen ein wesentlicher Betrachtungsgegenstand für die Erreichung möglichst wandelbarer Fabrikstrukturen.

#### 3.1.2.2 Funktion Lagern

Lagern ist jedes geplante Liegen des Arbeitsgegenstandes im Materialfluss [VDI-2411]. Ein Lager ist ein Raum beziehungsweise eine Fläche zum Aufbewahren von Stück- und/oder Schüttgut, das mengen- und/oder wertmäßig erfasst wird. Starke Veränderung des Marktes und damit von industriellen Abläufen wie z. B. die Vermehrung der Produktvarianten oder die gesteigerte Bedeutung des Lieferservices haben die Anforderungen an Lagersysteme zum Teil stark geändert. Die statische Funktion des Lagerns hat sich zum dynamischen Funktionselement im logistischen Gesamtsystem verändert. Aufgabe eines Lagers innerhalb des Materialflusssystems

ist das Bevorraten, Puffern und Verteilen von Gütern. Die zeitliche Struktur und Abfolge dieser Aufgaben sowie die Veränderung der Zusammensetzung der Ladeeinheiten charakterisiert das Lager als Vorrats-, Puffer- oder Verteillager:

- Vorratslager haben die Aufgabe, lang- und mittelfristige Bedarfsschwankungen im Bereich der Rohmaterialien, Zukauf- und Halbfertigteile auszugleichen. Die Bevorratung von Fertigteilen sichert die Lieferbereitschaft.
- Pufferlager gleichen kurzfristige Bedarfsschwankungen, z. B. zwischen Fertigungs- und Montagestationen oder auch innerhalb von Fertigungssystemen, aus. In Produktionssystemen werden überwiegend Pufferlager eingesetzt.
- Verteillager erfüllen neben der Bevorratungs- noch eine Kommissionierfunktion, bei der die Zusammensetzung der Ladeinheit zwischen Lagerzu- und Lagerabgang verändert wird.

Neben der wirtschaftlichen Gestaltung spielen bei der Planung von Lagersystemen zwei Aspekte eine entscheidende Rolle: der Lagerraum und der Durchsatz. Je nach Prioritäten des Anwendungsfalls kommen so unterschiedliche Komponenten der Subsysteme des Lagers zum Einsatz. Subsysteme des Lagers sind die Lagereinheit, die Lagereinrichtung in Verbindung mit den entsprechenden Lagerbediengeräten, die meist in das Lagersystem integrierte Kommissionierung, die Materialflusststeuerung, die Informationsflusststeuerung und das Lagergebäude.

Bei der Planung von Lagersystemen innerhalb des Materialflusses besteht die Aufgabe darin, durch eine Auswahl der verschiedenen Komponenten der Subsysteme eine für den jeweiligen Anwendungsfall optimale Kombination zu generieren. Der spezifische Anwendungsfall wird durch Kriterien wie z. B. die Eigenschaften, Abmessungen, Gewicht und Anzahl der zu lagernden Güter oder Durchsatzanforderungen definiert. Des Weiteren kommen der reinen Technik übergeordnete Einflussfaktoren wie Verfügbarkeit oder Flexibilität hinzu, die direkten Einfluss auf immer bedeutender werdende Logistikziele wie Lieferfähigkeit oder Termintreue haben.

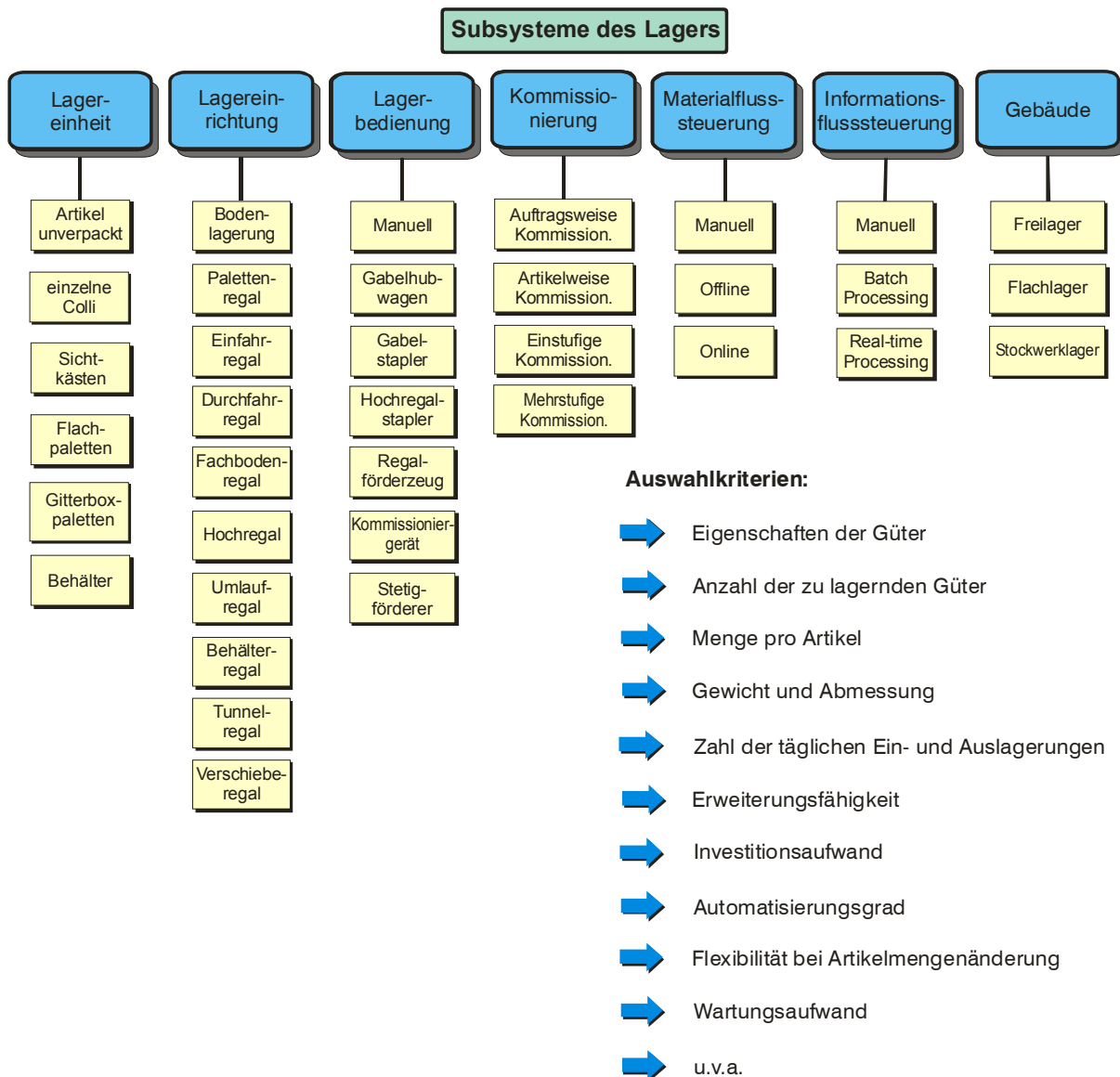


Abbildung 3-8: Subsysteme des Lagers mit Auswahlkriterien (nach [Gün-06b])

#### 3.1.2.3 Funktion Handhaben

Unter der Funktion Handhaben versteht man „das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern“ [VDI-2860]. Teilfunktionen des Handhabens stellen dabei das Speichern, Bewegen (z.B. Be- und Entladen), Sichern, Kontrollieren und Verändern von Gütern dar. Die Teilfunktionen werden weiter in Elementarfunktionen untergliedert, die kleinste, sinnvoll nicht weiter unterteilbare Funktionen darstellen (vgl. Abbildung 3-1).

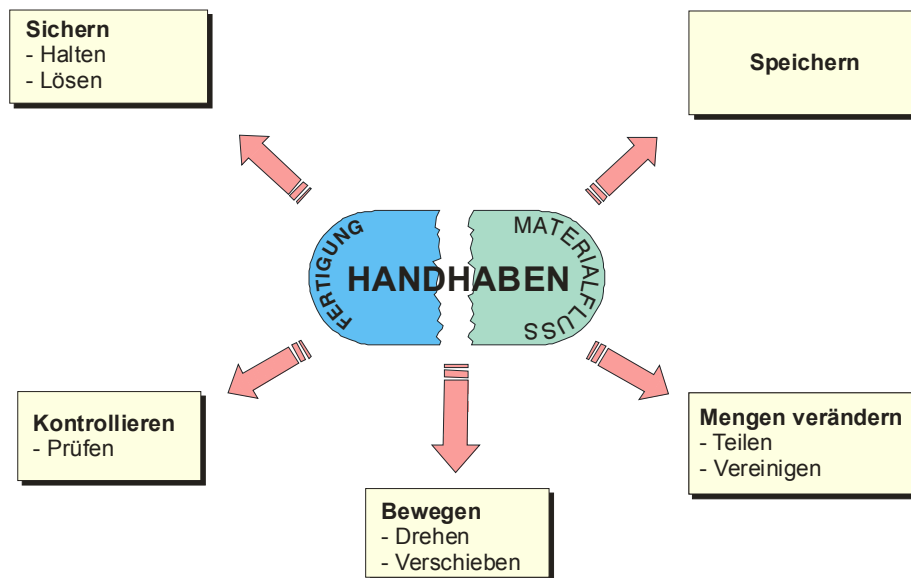


Abbildung 3-9: Teilfunktionen des Handhabens mit entsprechenden Elementarfunktionen [VDI-2860]

Das Handhaben kann als eine Funktion sowohl der Fertigung als auch des Materialflusses betrachtet werden. Klassische Handhabungsfunktionen in der Fertigung sind dabei z. B. Werkstückschwenken durch einen Roboter an einer Bearbeitungsmaschine oder das Spannen eines Teiles auf einer Bearbeitungsmaschine. Eine mögliche Handhabungsfunktion im Materialfluss ist z. B. das Palettieren. Unter Palettieren wird dabei die Stapelung von Stückgütern zu einem Stückgutstapel verstanden, wobei der Stückgutstapel aus einer oder mehreren Lagen besteht und die einzelnen Lagen aus einem Stückgut bzw. Stückgütern gebildet sind, die jeweils einem vorgegebenen Muster entsprechen.

Für die Funktionen Transportieren und Lagern sind im Allgemeinen nur Positionsbedingungen (z.B. Lagerort; Anfangs- und Endpunkt einer Transportbewegung) vorgegeben. Im Unterschied hierzu ist beim Handhaben zusätzlich immer die Orientierung der zu handhabenden Güter vorgegeben. Dieser Umstand grenzt die Funktion des Handhabens von den anderen beiden Funktionen ab.

### 3.1.3 Planung von Materialflusssystemen

Ein Teilziel dieses Forschungsprojektes Modulare Materialflusssysteme ist es, eine standardisierte Beschreibung der Materialflussmodule zu arbeiten, die in der Planung als Hilfsmittel herangezogen werden können. Aus diesem Grund ist es erforderlich alle während des Planungsprozesses benötigten Daten in dieser Beschreibung zu hinterlegen. In den folgenden Ausführungen sollen deshalb alle notwendigen Planungsdaten zusammengestellt werden.

Planungsaufgaben für Materialflusssysteme entstehen überwiegend im Zuge von Änderungen, Umstellungen und Erweiterungen bereits bestehender Einrichtungen. Die Planung „auf der grünen Wiese“ ist selten. Ein bereits vorgegebener Anfangszustand schränkt in den meisten Fällen die Freiheiten der Planung ein. Schon deshalb ist es notwendig, den vorhandenen Zustand mit allen daraus resultierenden Bedingungen im Rahmen der IST-Analyse hinreichend zu erfassen. Nur so kann sichergestellt werden, dass die gegebenen Voraussetzungen bei der Planung eines neuen Soll-Zustands bestmöglich genutzt und die Konsequenzen aus Zustandsänderungen richtig beurteilt werden.

Die IST-Analyse erstreckt sich primär auf den physischen Materialfluss einschließlich des damit verbundenen Informationsflusses. Neben den rein technischen sind stets auch betriebswirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen. Ferner ist es häufig nützlich oder sogar notwendig, sich über die physischen und logischen Schnittstellen hinausgehend mit ganz anderen als den unmittelbar betroffenen Materialflussbereichen zu beschäftigen. Nicht selten müssen beispielsweise Gebäudezustände, Standortbedingungen, Personalstrukturen und Behördenauflagen beachtet werden. Darum kann eine IST-Analyse je nach Zahl und Art ihrer Parameter oft nur in interdisziplinärer Zusammenarbeit durchgeführt werden. Das Interdisziplinäre ergibt sich im Grunde bereits aus dem Dienstleistungscharakter der Materialflussfunktionen, weil häufig die Bedingungen anderer Bereiche zu erfüllen sind (z.B. der Produktion, des öffentlichen Verkehrs, der Datenverarbeitung usw.) [Arn-03].

In der folgenden Tabelle 3-2 sind die wichtigsten Parameter aufgelistet, die bei der Durchführung einer Ist-Analyse bei Materialflussplanungen zu berücksichtigen sind [Arn-03]:



### 3.1 Materialflusssysteme – Einteilung und Eigenschaften

Begriffe:	Beispiele:
<b>1. Daten Fördergüter</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abmessungen, Volumina, Gewichte</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betrieblicher Durchsatz</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kennzeichnungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nummerierung</li> <li>• Codierung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialmerkmale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stoß- und druckempfindlich</li> <li>• Schmutzempfindlich</li> <li>• Begrenzt lagerfähig</li> <li>• Usw.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwaltung der Bestände</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stammdaten</li> <li>• Warenstruktur</li> <li>• Inventur</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ladungsträger</li> </ul>	
<b>2. Daten vorhandener Fördermittel und Lager</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapazitäten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fassungsvermögen</li> <li>• Lagerplätze</li> <li>• Usw.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsdaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taktzeiten</li> <li>• Spielzeiten, Bedienzeiten. Reaktionszeiten, Greifzeiten</li> <li>• Geschwindigkeiten, Beschleunigungen</li> <li>• Usw.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchsätze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grenzdurchsatz</li> <li>• Lagerumschlag</li> <li>• Usw.</li> </ul>

### 3 Materialflusssysteme

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Personalbedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• für Betrieb</li> <li>• für Wartung und Störungsbehebung</li> <li>• Usw.</li> </ul>
<b>3. Produktionstechnische Daten</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stückzahlen</li> <li>• Produktgruppen</li> <li>• Losgrößen</li> <li>• Usw.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fertigungstechnik</li> <li>• Fertigungseinrichtungen</li> <li>• Fertigungsorganisation</li> <li>• Usw.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufträge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auftragseingänge</li> <li>• Durchlaufzeiten</li> <li>• Bestände</li> <li>• Terminplanung</li> <li>• Usw.</li> </ul>
<b>4. Daten des externen Warentransports</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lieferanten-/Kundenbeziehungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengen</li> <li>• Entfernungen,</li> <li>• Verkehrsmittel</li> <li>• Usw.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• physische und DV-Schnittstellen im Wareneingang und im Warenausgang</li> </ul>	
<b>5. Betriebswirtschaftliche Daten</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investitionen, Kapitalbindungskosten</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebskosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie</li> <li>• Wartung</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Personal</li> </ul>
<b>6. Sonstige Parameter</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebäude, Grundstück</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zustand</li> <li>• Größe</li> <li>• Nutzung</li> <li>• Usw.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unternehmensstrategie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fertigungstiefe</li> <li>• Kooperationen</li> <li>• Ziele der strategischen Planung</li> <li>• Usw.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Allgemeine Auflagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesetze</li> <li>• Tarifverträge</li> <li>• diverse Verordnungen und Richtlinien</li> <li>• Usw.</li> </ul>

Tabelle 3-2: Überblick über die bei einer Ist-Analyse zu berücksichtigten Daten

Um die zukünftige Unternehmensentwicklung in die Planung einbeziehen zu können, wird aus dem ermittelten Ist-Zustand der gewünschte Soll-Zustand abgeleitet. Dazu wird aus den aufgenommenen Ist-Daten und Kennzahlen ein bereinigtes Ist-Datengerüst erarbeitet und aus diesem mit Hilfe von Trendberechnungs- und Prognosemethoden ein Soll-Datengerüst erzeugt [Gün-91], [Jün-89]. Gegebenenfalls können Soll-Daten aber auch durch Vorgaben der Geschäftsführung entstehen. Nach dem Ermitteln der Soll-Daten muss ein besonderes Augenmerk auf die Beeinflussung des Soll-Zustandes durch die Planungsziele gelegt werden, da sich erwartete oder geplante Umgestaltungen innerhalb der Artikel- und Auftragsstruktur sowie der Auftragsabwicklung ganz entscheidend auf die Soll-Daten auswirken



## 4 Wandelbare Materialflusssysteme

### 4.1 Allgemeine Anforderungen an wandelbare Fabrikstrukturen

Produzierende Unternehmen müssen sich immer größeren Herausforderungen stellen, um im globalen Wettbewerb bestehen zu können. Zukünftige Fabriken müssen hinsichtlich Größe, Funktion und Struktur an veränderte Rahmenbedingungen schneller anpassbar sein, im Extremfall sogar als ganzes mobil sein, um sich in den rasch verändernden Märkten behaupten zu können

#### 4.1.1 Flexibilität

Um die Fähigkeit von Fabrikssystemen zu beschreiben, wie diese sich auf Veränderungen einstellen und anpassen können, bietet die Literatur eine Vielzahl an Begriffen auf. Im betriebswirtschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Umfeld wird in diesem Zusammenhang oft mit inflationärer Häufigkeit der Begriff der Flexibilität gewählt.

Der Begriff Flexibilität (von lat. *flexibilis*: biegsam, elastisch, anpassungsfähig [Dud-01]) wird seit den 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts in Bezug auf Fertigungssysteme verwendet und löste den bis dahin gebräuchlichen Begriff der Elastizität ab [Ost-93], [Hau-98]. Schon 1954 definiert ihn Riebel recht allgemein als "Anpassungsfähigkeit, Umgruppierungsfähigkeit und Beweglichkeit einer Unternehmung" [Rie-54].

Besondere Bedeutung erlangte der Begriff der Flexibilität durch die verstärkte Automatisierung der Fertigungsanlagen, die in den siebziger Jahren durch die rasanten Fortschritte in der Prozessrechen-technik und den Zwang zur Produktivitätserhöhung durch den verstärkten Konkurrenzkampf mit asiatischen Konzernen ausgelöst wurde [Ost-93].

War den Fertigungssystemen mit geringem Automatisierungsgrad durch die überwiegende Handarbeit eine gewisse Flexibilität immanent, ist bei den hoch automati-

sierten Systemen der Bereich, in dem eine wirtschaftliche Fertigung möglich ist, sehr klein. Zudem erfordern sie hohe Investitionen, die nur dann wieder erwirtschaftet werden können, wenn das Fertigungssystem auch tatsächlich über die geplante Lebensdauer hinweg unter unveränderten und als Planungsgrundlage angenommenen Randbedingungen arbeiten kann. Anpassungen an neue Produkte sind meist nur durch einen vollständigen Umbau zu realisieren. Eine Wiederverwendung der Anlagen ist durch die mit der Automatisierung einhergehende starke Spezialisierung wenn überhaupt nur nach aufwändiger Umrüstung möglich.

Dieses Dilemma zwischen hoher Produktivität durch starke Automatisierung und der damit einhergehenden geringen Reaktionsfähigkeit der Unternehmen gab den Anstoß für eine verstärkte Forschungstätigkeit zum Thema Flexibilität. Mit der Zeit entstanden dabei, je nach Zielsetzung des jeweiligen Autors, eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen, die sich jedoch in weiten Teilen überschneiden. De Toni und Tonchia, die eine nahezu unüberschaubare Menge an Definitionsvorschlägen zu diesem Begriff sammelten, stellen übereinstimmend fest, dass die Flexibilität als eine "Anpassungsfähigkeit auf der Ebene der im Betrieb verfügbaren Kapazitäten" definiert wird [DeT-98]. Es handelt sich somit um eine Anpassung, die sich auf bereits vorgedachten und vorhergesehenen Bahnen bewegt [Hau-98], [Her-03].

Wird eine systemtechnische Sicht auf die Fabrik gewählt, fällt die gute Übereinstimmung dieser Flexibilitätsdefinition mit der Systemveränderung durch Strukturkopplung auf (vgl. Kapitel 5.1). Es handelt sich also um eine Anpassung an geänderte Randbedingungen durch eine geänderte Vernetzung der bereits im System befindlichen Elemente. In Bezug auf die Anpassungsfähigkeit eines Fertigungssystems wird Flexibilität als

*"Die Fähigkeit, eine vorgegebene Vielfalt von Fertigungsaufgaben bei zufälligen oder systembedingten Änderungen der Eingangsgrößen zu bewältigen, ohne dass das System in seiner Grundkonzeption verändert werden muss" [Ost-93]*

verstanden, wobei die Grundkonzeption als Art, Anzahl und Kopplungen der Systemkomponenten festgelegt wird.

Die genannten Definitionen lassen erkennen, dass die Flexibilität aus fabrikplanerischer Sicht vermehrt einer ablauforganisierten Veränderung gleichzusetzen ist und

eher statischen Charakter aufweist. Dieser Eindruck wird durch die Ausführungen von Gollwitzer und Karl im Zusammenhang mit Logistik und Flexibilität bestätigt [Gol-98]. Sie definieren Flexibilität als Fähigkeit, auf kurzfristige Kundenwünschänderungen hinsichtlich Spezifikationen, Mengen und Terminen einzugehen.

In den ingenieurwissenschaftlichen Betrachtungen von Flexibilität ist erkennbar, dass die statische Flexibilität zwar eine notwendige, aber nicht hinreichende Größe darstellt, um im turbulenten Umfeld angemessen zu agieren. Die Gründe hierfür liefern zahlreiche Autoren:

- Statische Flexibilität erlaubt nur die Möglichkeit zur Veränderung in vorgehaltenen Dimensionen [Rei-99], [Wie-00a], [Spa-01].
- Den Entwicklungen flexibler Lösungen ist gemein, dass bereits bei deren Planung die Wirkrichtung, also die Dimension der Flexibilität, festgelegt wird [Sua-96].
- Der Flexibilitätsspielraum wird zum Zeitpunkt der Spezifikation des Systems hineinkonstruiert [Wes-00].
- Flexibilität ist eine passive Größe, da Veränderungen stets von außen induziert werden [War-98], [Wes-00].
- Der Markt orientiert sich nicht an der betrieblichen Flexibilität, die in vorgehaltenen Grenzen existiert, sondern erfordert größere Anforderungen als erwartet. Die betriebliche Flexibilität greift in solchen Fällen nicht mehr [Sch-98b].
- Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Veränderungen, die mehr als eine statische Flexibilität erfordern, ist in der Zukunft hoch [Wie-00a].

Die Flexibilität kann nach ihrem zeitlichen Charakter in operative und strategische Flexibilität unterteilt werden. Nach [Gün-97] beschreibt die operative Flexibilität die Fähigkeit, auf kurzfristig veränderte Umweltbedingungen zu reagieren, während der Betrachtungszeitraum der strategischen Flexibilität weiter gefasst ist und sie die Anpassungsfähigkeit an längerfristige Anforderungsänderungen beschreibt.

In der weiterführenden Betrachtung wird die Flexibilität als Eigenschaft eines Systems aufgefasst, in vorgehaltenen und vorgeplanten Dimensionen und Szenarien zu agieren. Anders zusammengefasst beschreibt die Flexibilität das Potenzial eines

Systems, sich ohne jegliche Umbaumaßnahme an die neuen Randbedingungen anzupassen.

Bei der Gestaltung von Fabrikstrukturen oder in diesem Fall von Materialflusssystemen wird somit schon in der Planungsphase das Flexibilitätspotenzial eines Systems festgelegt. Dabei wird nur noch zwischen dem Zeitpunkt, in dem die Flexibilität aktiviert wird, unterschieden (vgl. Abbildung 4-1). Turbulenzen, die im laufenden Betrieb, also operativ auftreten, werden schon bei der Erstinvestition mit berücksichtigt. Sie stellen dann die **Basisflexibilität** eines Systems dar. Wird die Flexibilität erst zu einem späteren Zeitpunkt benötigt, z.B. durch die geplante Einführung eines neuen Produktes, wird aus wirtschaftlichen Gründen nicht sofort investiert, sondern erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt eine Erweiterung des Systems und somit erst dann eine Aktivierung des zusätzlichen Flexibilitätspotenzials. Diese Erweiterungen stellen aber immer geplante Ereignisse dar. In diesem Fall wird von **erweiterter Flexibilität** gesprochen. Mit der zusätzlichen Betrachtungsweise der erweiterten Flexibilität ist es möglich, die Fixkosten eines Systems gering zu halten. Sowohl die Basisflexibilität als auch die erweiterte Flexibilität beruhen auf geplanten und vorgedachten Ereignissen, nur der Zeitpunkt der Investition ist unterschiedlich.

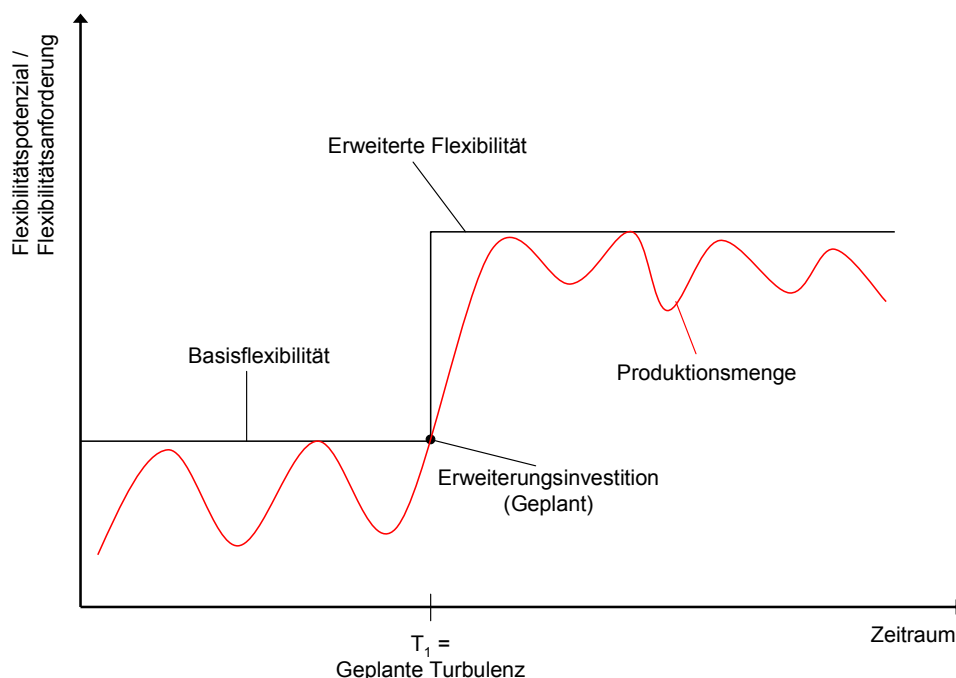


Abbildung 4-1: Zusammenspiel Basisflexibilität und erweiterte Flexibilität



Weil die zunehmende Turbulenz eine immer stärkere Veränderungsanforderung an Unternehmen impliziert, eine latente Wandlungsträgheit vieler Unternehmen vorherrscht und weil die Flexibilität keine hinreichende Größe der Veränderungsfähigkeit eines Unternehmens darstellt, resultiert die Erfordernis nach einer neuartigen, dynamischen Definition für Anpassungsfähigkeit.

### 4.1.2 Wandlungsfähigkeit und Wandelbarkeit

Bei Betrachtung eines längeren Zeitraumes wird offensichtlich, dass reine Flexibilität nicht ausreicht, eine Fabrik an die sich ändernden Gegebenheiten anzupassen. Es werden sich immer auch ungeplante und unvorhergesehene Änderungen in den Randbedingungen ergeben, die nicht durch eine Strukturkopplung, das heißt eine Änderung der Verknüpfung der Relationen des Systems Fabrik, ausgeglichen werden können, sondern eine Transformation des Systems erfordern (vgl. Kapitel 5.1).

Bei der Planung von zukunftsfähigen Systemen reicht die Berücksichtigung der Flexibilität nicht aus. Reinhart geht davon aus, dass für unerwartete neue Marktanforderungen allein vorgedachte flexible Lösungen nicht ausreichen. Daher schlägt er ein neues Potenzial zur Veränderung vor, das als Ergänzung zur Flexibilität fungiert. Er bezeichnet dieses Potenzial als Reaktionsfähigkeit, die eine multi-dimensionale Veränderung ermöglicht [Rei-99], [Rei-00]. Reaktionsfähigkeit wird definiert als ein Potenzial, um jenseits vorgedachter Dimensionen und Korridore agieren zu können. Hierbei wird ein Zusammenhang zwischen Flexibilität und Reaktionsfähigkeit vorausgesetzt. Reinhart differenziert dabei das Unternehmensumfeld nach dem Grad der Turbulenz in turbulent, indifferent und sicher. Die Notwendigkeit von Flexibilität nimmt mit zunehmender Turbulenz ab, die erforderliche Reaktionsfähigkeit jedoch zu. Reinhart definiert die Summe von Reaktionsfähigkeit und Flexibilität als Wandlungsfähigkeit (vgl. Abbildung 4-2

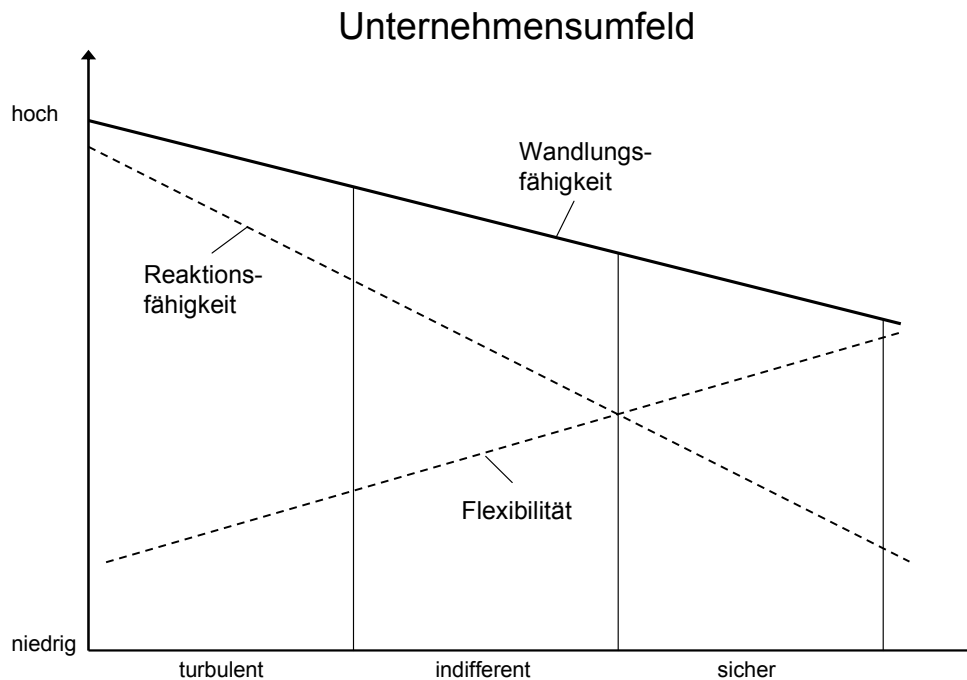


Abbildung 4-2: Ansatz zur Abschätzung der notwendigen Wandlungsfähigkeit  
[Rei-00]

Westkämper [Wes-03] versteht unter Wandlungsfähigkeit die Eigenschaft frühzeitige und vorausschauende Anpassungen der Unternehmensstrukturen und –prozesse aufgrund von Turbulenzen durchzuführen. „Ein System wird als wandlungsfähig bezeichnet, wenn es aus sich selbst heraus über gezielt einsetzbare Prozess- und Strukturvariabilität sowie Verhaltensvariabilität verfügt. Wandlungsfähige Systeme sind in der Lage, neben reaktiven Anpassungen auch antizipative Eingriffe vorzunehmen. Diese Aktivitäten können auf Systemveränderungen wie auch auf Umfeldveränderungen hin wirken“ [Wes-00].

Westkämper unterscheidet zwischen den Begriffen der Flexibilität, der Wandelbarkeit und der Wandlungsfähigkeit. Als Flexibilität bezeichnet er ein passives Merkmal für Veränderungen in einem vorgegebenen Handlungsspielraum. Tritt eine räumliche Veränderung in der Gestaltung zusätzlich auf, spricht Westkämper von der Wandelbarkeit des Systems. Westkämper fordert weiterhin eine vom Menschen mit einzubringende Kreativität und Intelligenz, um den Wandel aktiv aus sich selbst heraus zu gestalten. Hierbei wird impliziert, dass Wandelbarkeit ausschließlich auf technische

Teilsysteme, die Wandlungsfähigkeit aber sowohl auf technische als auch auf soziale Teilsysteme abzielt (vgl. Abbildung 4-3).

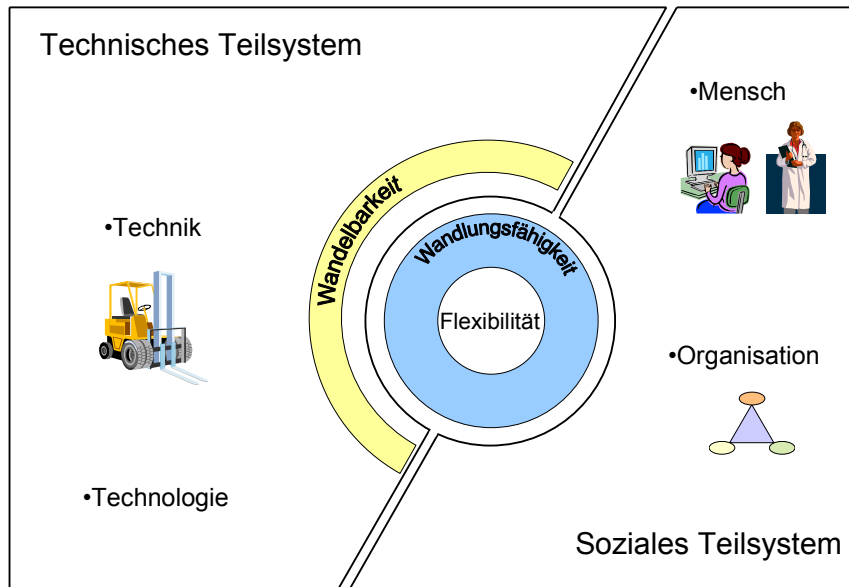


Abbildung 4-3: Zusammenhang Wandlungsfähigkeit – Wandelbarkeit [Wes-00]

Eine weitere Definition von Anpassungsfähigkeit eines Systems liefert das abgeschlossene Forschungsprojekt „Plug+Produce“ [Hil-05]. Dabei wird bei dieser Definition der Begriff Wandlungsfähigkeit gänzlich umgangen, stattdessen wird das Anpassungspotenzial einer Fabrik durch die beiden Komponenten Basisflexibilität und erweiterte Flexibilität definiert. Unter Basisflexibilität wird die Flexibilität eines Systems, das ohne Veränderungen des Systemaufbaus auf Veränderungen reagieren kann, verstanden. Die Definition der Basisflexibilität ist dem klassischen Begriff der Flexibilität gleichzusetzen. Die erweiterte Flexibilität beschreibt hingegen die Flexibilität von Fabrikssystemen, die durch Veränderungen des Systemaufbaus, also Veränderungen in der Art, der Anzahl und der räumlichen Anordnung der einzelnen Systemelemente umgesetzt werden. Durch diese Eigenschaft wird ein wandlungsfähiges System ermöglicht. Die erweiterte Flexibilität eröffnet Anpassungsmöglichkeiten, wie z.B. dem Aus- oder Rückbau von Kapazitäten durch die Integration von Maschinen oder Personal.

Wie aus den vorgestellten Ausführungen zu entnehmen ist, geht Wandlungsfähigkeit über die klassische Flexibilität hinaus. Die Flexibilität kann als ein definierter Spiel-

raum zur Veränderung bezeichnet werden, der nur eine elastische Anpassung ohne eine substantielle Veränderung des Fabrikaufbaus ermöglicht. Wandlungsfähigkeit stellt vielmehr ein Potenzial dar, über einen vordefinierten Handlungsspielraum hinaus auf Veränderungen mit relativ geringem Aufwand reagieren zu können und stellt somit das zu diesem Zeitpunkt benötigte Flexibilitätspotenzial zur Verfügung (vgl. Abbildung 4-4). Zusammenfassend kann Wandlungsfähigkeit als Systemeigenschaft verstanden werden, sowohl auf geplante als auch auf ungeplante Ereignisse effektiv und effizient zu reagieren [Wie-05], [Rei-04]. Flexibilität, mit den aus Kapitel 4.1.1 beschriebenen Bestandteilen „Basisflexibilität“ und „erweiterte Flexibilität“, ist dabei ein Bestandteil der Wandlungsfähigkeit.

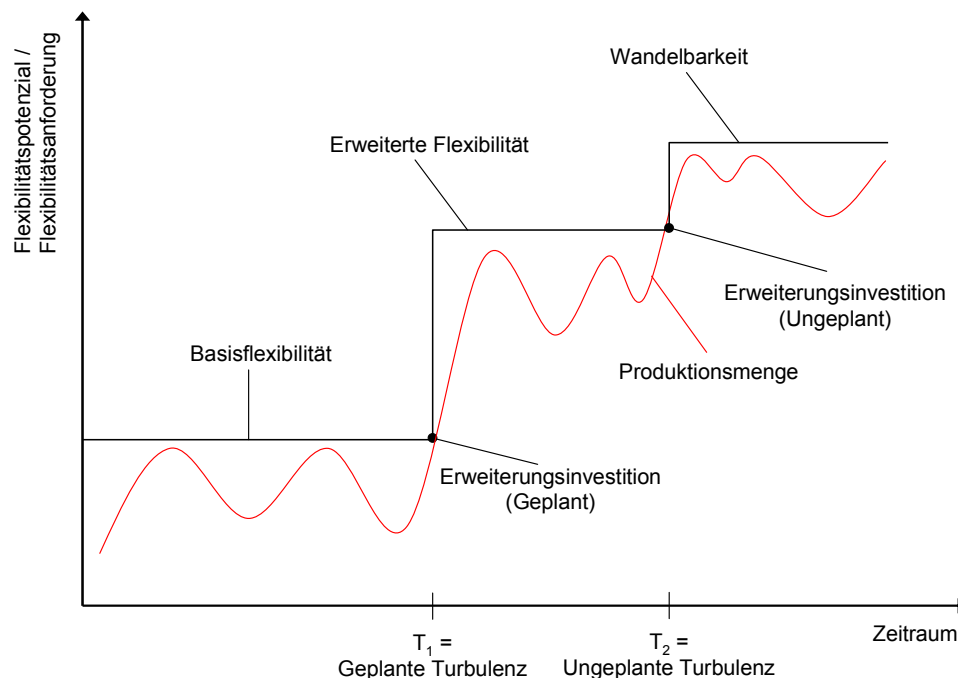


Abbildung 4-4: Zusammenspiel Flexibilität und Wandelbarkeit

### 4.1.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Ein wichtiges Merkmal für die Wandlungsfähigkeit stellt die Wirtschaftlichkeit dar. Oftmals wird in der Literatur nur ein hohes Maß an Wandelbarkeit gefordert, ohne aber die Wirtschaftlichkeit eines solchen Systems zu betrachten.

Nach Witte drückt sich Wandlungsfähigkeit darin aus, dass ein betrachtetes System, in diesem Fall eine Fabrik oder das Materialflusssystem, auf unterschiedliche Anforderungen in der Zukunft angepasst werden kann, ohne sein hohes Maß an Wirtschaftlichkeit zu verlieren. Voraussetzung für ein wandlungsfähiges System ist ein schneller und kostengünstiger Wandlungsprozess. Darüber hinaus ist sicherzustellen, dass auch mit der veränderten Systemkonfiguration im Anschluss an den Wandlungsprozess ein kostengünstiger Betrieb möglich ist [Wit-04], [Wit-05].

Bei der Definition von Wandlungsfähigkeit wird laut Schuh oftmals übersehen, dass die relative Vorteilhaftigkeit der Wandelbarkeit mit zunehmendem Grad an Wandlungsfähigkeit abnimmt. Dabei wird angenommen, dass sich der Aufwand mit steigendem Grad an Wandlungsfähigkeit nicht linear, sondern exponentiell entwickeln wird (Abbildung 4-5) [Sch-04a]. Demnach ist ein Streben nach der höchsten Wandlungsfähigkeit nicht immer die beste Lösung. Nicht der höchste Bruttonutzen ist entscheidend, sondern der Nettonutzen, d.h. das optimale Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen der Wandlungsfähigkeit, gilt es zu maximieren.

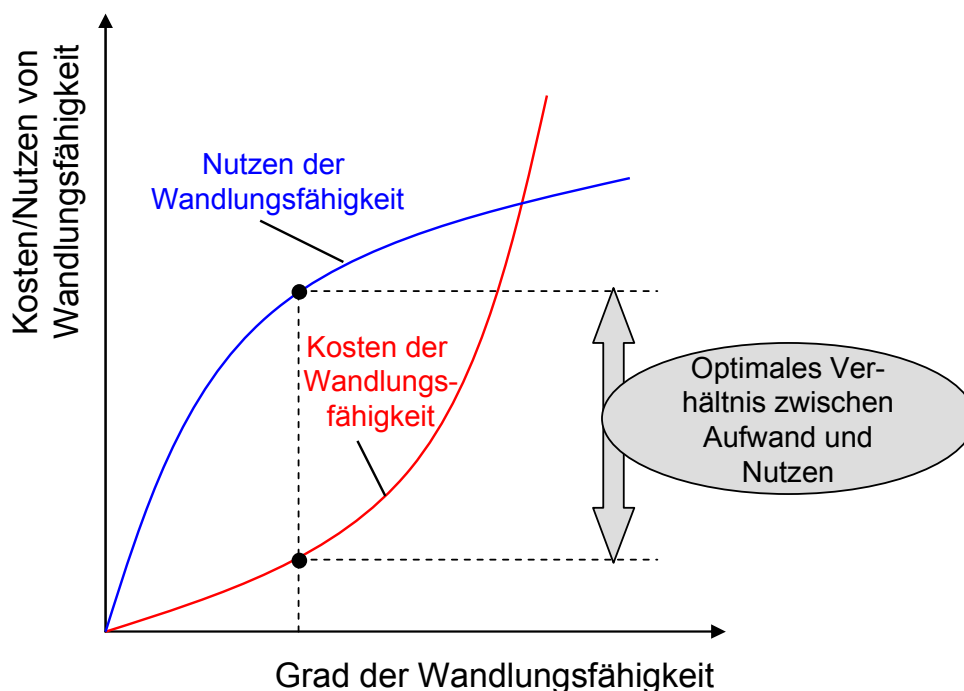


Abbildung 4-5: Nutzen der Wandlungsfähigkeit

Zusammenfassend kann man festhalten, dass nicht zu Beginn in ein System mit allerhöchster Wandelbarkeit zu investieren ist, sondern das System so gestaltet werden sollte, dass es mit geringem Aufwand an die neuen Rahmenbedingungen angepasst werden kann.

Die Kosten der Wandlungsfähigkeit lassen sich aus den Investitionskosten des Systems und den Kosten für die im Lebenszyklus anfallenden Wandlungsprozesse zusammensetzen [Wes-02], [Wie-03a]. Eine Übersicht über die bei einer wirtschaftlichen Betrachtungsweise notwendigen Kostenarten zeigt Tabelle 4-1.

Investitionskosten	Wandlungsprozesskosten	
	Direkte Kosten	Indirekte Kosten:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anfangs-, Erst-, Einrichtungskosten</li> <li>• Ersatz-, Zusatzinvestitionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umstellung, Abbau</li> <li>• Wiederherstellung der Prozessfähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produktionsausfall (= Entgangener Gewinn)</li> <li>• Mehrarbeit</li> <li>• Bestandskosten</li> </ul>

Tabelle 4-1: Kostenarten bei wandlungsfähigen Systemen

Die Investitionskosten resultieren aus den Anfangs-, Einrichtungs- oder Zusatzinvestitionen. Anfangs- oder Einrichtungskosten entstehen für die Beschaffung eines Systems. Eine Zusatzinvestition ist beispielsweise die Ausstattung einer Maschine mit einem selbst tragenden Gestell, durch das die Fundamentierung entfällt. Die genannten Investitionskosten fallen einmalig an und stellen unter der Annahme einer linearen Abschreibung Fixkosten dar [Wie-05].

Die Wandlungsprozesskosten lassen sich in direkte und indirekte Durchführungskosten aufteilen. Die direkten Wandlungsprozesskosten umfassen z.B. die Kosten für die Umstellung und den Abbau von einzelnen Systemelementen. Indirekte Kosten entstehen z.B. durch den während des Umbaus hervorgerufenen Produktionsausfall. Wandlungsprozesskosten fallen bei jedem Wandel an und bilden daher den variablen Teil der Wandlungskosten [Nyh-04a].

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von verschiedenen Planungsvarianten kann basierend auf den Wandlungskosten durchgeführt werden. Dabei gilt es im Span-

nungsfeld der beiden Kostenarten – Investitionskosten und Wandlungsprozesskosten – ein Optimum zu finden (vgl. Abbildung 4-6). Eine wandlungsträgere Fabrik ist in der Regel durch niedrige Investitionskosten charakterisiert, zieht aber höhere Kosten für Veränderungen nach sich. Eine wandlungsfähige Fabrik besitzt im Vergleich dazu höhere Investitionskosten, die im Laufe der Zeit durch die geringen Anpassungskosten kompensiert werden. Entscheidend für die wirtschaftliche Bewertung und die Auswahl eines geeigneten Systems ist in jedem Fall der benötigte Grad an Wandlungsfähigkeit [Nyh-04b].

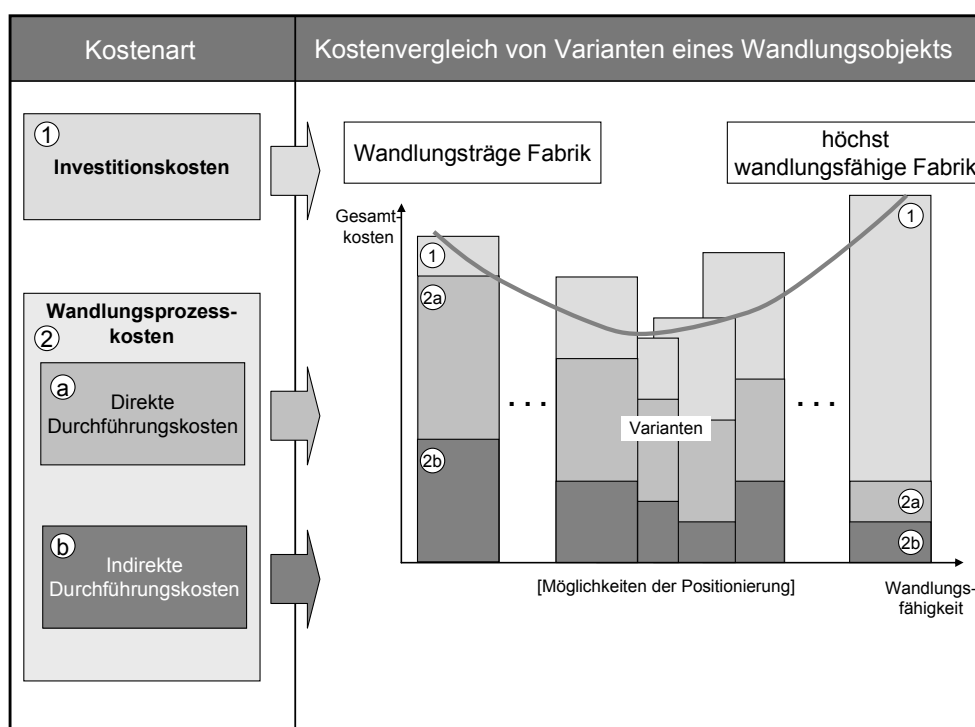


Abbildung 4-6: Kostenarten und –vergleich wandlungsfähiger Systeme  
(nach [Nyh-04a])

Da die Wandlungsfähigkeit aber als Reaktion auf ungeplante Ereignisse definiert ist, ist es nur schwer möglich, die zukünftigen Anpassungen abzuschätzen. Um jedoch eine Aussage zu bekommen, bedient man sich einiger Methodiken. Eine erprobte Methode zur Ermittlung der zu erwartenden Wandlungsfähigkeit stellt das Szenario-Management dar [Her-03], [Nyh-04a]. Neben dem Szenariomanagement gibt es noch weitere Ansätze, die Wirtschaftlichkeit von wandlungsfähigen Systemen abzuschätzen. Mit der Methode der Realoption ist die Möglichkeit geschaffen, die Vorteilhaftigkeit einer Investition in einer turbulenten Marktumgebung und unter sich immer

ändernden Rahmenbedingungen zu überprüfen. Im Gegensatz zur herkömmlichen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die von einem einzigen Zukunftsszenario ausgeht, können mit dem Realloptionsansatz, basierend auf Bewertungsmodellen für Finanzoptionen, reale Handlungsoptionen in die Bewertung mit eingeschlossen und damit das Defizit traditioneller Investitionsverfahren überwunden werden [Zäh-04a], [Zäh-04b].

Ein weiterer Ansatz zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von dynamischen Systemen stellt die Methode der Lebenszyklusbewertung dar. Mit Hilfe dieser Planungsmethodik ist es möglich, die Leistung von Produktionssystemen über dessen gesamte Lebensdauer zu bewerten und somit langfristig den optimalen Grad an Flexibilität für Produktionssysteme zu bestimmen [Sch-05].

Auf Basis dieser Wandelbarkeitsabschätzungen ist es demnach möglich, unter mehreren Varianten über den gesamten Lebenszyklus betrachtet die wirtschaftlichste Lösung zu ermitteln und somit den notwendigen Grad an Wandelbarkeit bei der Erstinvestition abzuschätzen.

## **4.2 Bewertung der Wandelbarkeit von Materialflusssystemen**

### **4.2.1 Flexible Materialflusssysteme**

Soll die Flexibilität eines Materialflusssystems bewertet werden, ist es sinnvoll, die Komplexität des Flexibilitätsbegriffs durch eine weitere Unterteilung in voneinander unabhängige Flexibilitätsarten zu verringern. Es hat sich jedoch wegen der fließenden Übergänge keine einheitliche Beschreibung unabhängiger Flexibilitätsarten durchgesetzt.

Konkretisiert auf Materialflusssysteme und -technik wurden folgende Ansätze zur Definition von Eigenschaften und Anforderungen flexibler Systeme erarbeitet:



- Neben der Gliederung in beschreibende Flexibilitätsarten wird in [Hal-99] eine Strukturierung der Flexibilität nach Zielen vorgeschlagen (vgl. Abbildung 4-7). Aus dem Unternehmensumfeld wird dort mit Hilfe einer Kategorisierung verschiedener Einflussfaktoren systematisch der Flexibilitätsbedarf von Materialflusssystemen analysiert und die resultierenden, operativen und strategischen Flexibilitätsziele abgeleitet. Dazu zählen:
  - die Stabilität gegenüber kurzfristigen Bedarfsänderungen
  - die Robustheit gegenüber der Stochastik zusammen mit den inneren Abhängigkeiten eines Systems
  - die Anpassbarkeit an neue Produkte und Volumen und
  - die Integrierbarkeit technischer Änderungen

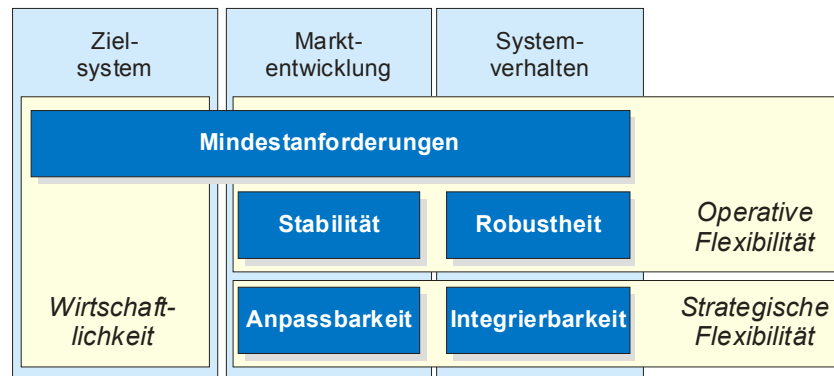


Abbildung 4-7: Untergliederung der Flexibilitätsziele [Hal-99]

- In [Bul-94] wird bei der Bewertung von Transportmitteln in der Materialbereitstellung zwischen der Flexibilität bei Layoutänderungen, der Flexibilität bei Änderung der Förderleistung und der Flexibilität bei Änderung des Transportguts unterschieden. Zusätzlich wird die Forderung nach Integrierbarkeit in automatisierte Systeme und Erweiterungsfähigkeit der bestehenden Systeme gestellt.
- [Ble-99] unterscheidet für die Anforderungen an Materialflusststeuerungen zwischen Veränderungsfähigkeit, Strategievariabilität, Planungsunterstützung und Aktualität der Planung. Dabei sind unter dem Begriff Veränderungsfähigkeit die Anforderungen an Layoutveränderungen, Austausch und Erweiterung von Materialflusssystemen und weitere organisatorische Veränderungen zusammengefasst.

- Zwischen Ortsflexibilität bzw. Layoutflexibilität bezüglich neuer Auf- und Abgabeorte, Prozessflexibilität hinsichtlich veränderbarer Funktionen (Beispiel Automatisierungsgrad), Umfangsflexibilität (Erweiter- oder Reduzierbarkeit) und Leistungs- oder Durchsatzflexibilität wird in [Bam-01] unterschieden.
- In einem abgeschlossenen AiF-Forschungsprojekt, ein Gemeinschaftsprojekt der Uni Dortmund und des Fraunhofer Instituts für Materialfluss und Logistik in Dortmund, wurden die Einflüsse der Lagertechnik, Lagerbedienung und der Fördermittel auf die Flexibilität der Materialbereitstellung näher untersucht [Hom-04]. Veränderungen können hinsichtlich der zu handhabenden Artikel auftreten, z. B. ergeben sich bei Saisonartikeln, bei der Lagerung unterschiedlicher Artikel oder bei Änderungen der Artikel aufgrund wachsender Produktvarianten Unterschiede in den Abmessungen und Gewichten. Weiterhin können Veränderungen hinsichtlich der Transportkapazitäten und -leistungen auftreten, die sich aus Änderungen der Mengenströme, der Frequenzen und der Transportwege ergeben. Von Vorteil ist es, wenn Lager- und Fördertechnik geeignet für Kapazitäts- und Leistungserweiterungen sind. Darüber hinaus sollen Leistungsreserven für eine kurzfristige Reaktion zur Durchführung von Eilaufträgen und Notfallkonzepten vorliegen. Speziell wurden für die Fördermittel (Tabelle 4-2), die Lagertechnik (Tabelle 4-3) und Lagerbedienung (Tabelle 4-4) folgende Kriterien für die Flexibilität erarbeitet:

<b>Flexibilitätskriterien</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Änderung der Transportwege</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Änderung der Bereitstell- und Übernahmepunkte</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Leistungsflexibilität bzgl. Transportkapazitäten und -frequenzen</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Leistungsflexibilität bzgl. Abruf- und Bereitstellzeiten</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Handhabung unterschiedlicher Artikel- und Ladehilfsmittelspektren</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Technischer Ausfall und Notfallkonzepte</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Reaktionsfähigkeit und Durchführung von Eilaufträgen</li></ul>

Tabelle 4-2: Einfluss der Fördermittel auf die Flexibilität

<b>Flexibilitätskriterien</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Leistungsflexibilität bzgl. Ein-/Auslager- und Bestandsschwankungen</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Lagerung unterschiedlicher Artikel- und Ladehilfsmittelspektren</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Erweiterungsfähigkeit der Lagerstellplatzkapazitäten</li></ul>

Tabelle 4-3: Einfluss der Lagertechnik auf die Flexibilität

<b>Flexibilitätskriterien</b>
• Leistungsflexibilität bzgl. Ein-/Auslagerungen
• Handhabung unterschiedlicher Artikel und Ladehilfsmittelspektren
• Übernahme von Aufgaben in der Lagervorzone
• Layout- und Übergabepunktänderungen
• Reaktionsfähigkeit und Durchführung von Eilaufträgen
• Technischer Ausfall und Notfallstrategien

Tabelle 4-4: Einfluss der Lagerbediengeräte auf die Flexibilität

- Bei der Ermittlung der Anforderungen an Materialflusssysteme in dynamischen Produktionsstrukturen wird neben den bereits genannten Eigenschaften der Produktmixflexibilität, Layoutflexibilität, Erweiterungsfähigkeit, Durchsatzflexibilität und Integrationsfähigkeit auch die Flexibilität des Automatisierungsgrades gefordert (vgl. Abbildung 4-8) [Han-01]. Darunter ist zu verstehen, dass flexible Materialflusssysteme unterschiedliche Automatisierungsgrade sowohl auf der operativen als auch auf der dispositiven Seite annehmen können. Somit soll sich ein optimaler Betriebspunkt zwischen Flexibilitätsanforderungen, Kosten und Automatisierungsgrad einstellen lassen.

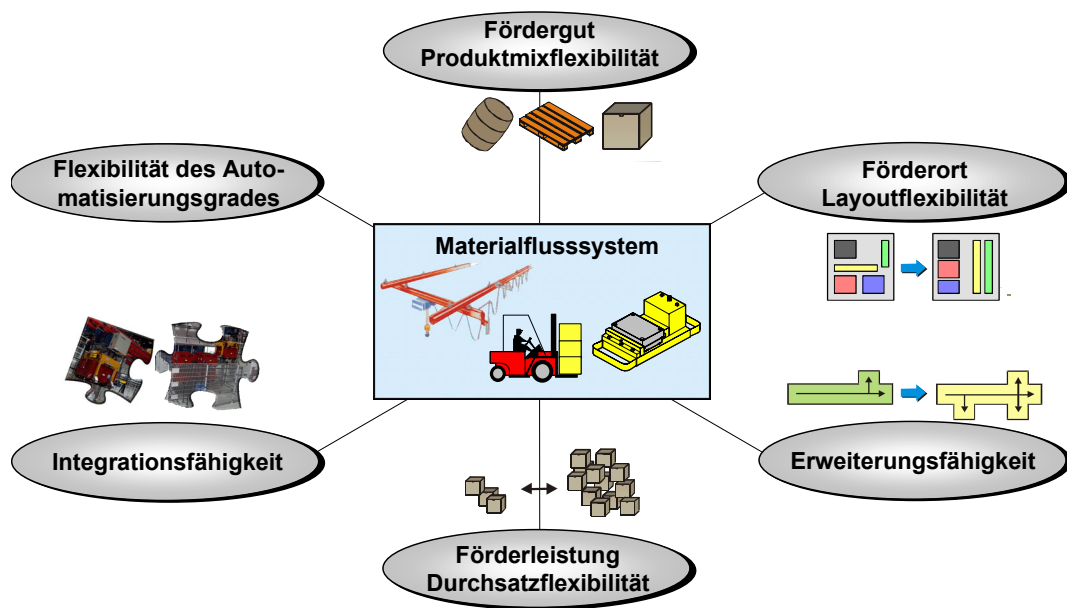


Abbildung 4-8: Flexibilitätsanforderungen an Materialflusssysteme nach [Han-01]

Werden alle aufgeführten Definitionen der Flexibilität eines Materialflusssystems zusammengeführt und die gemeinsame Schnittmenge daraus gebildet, ergeben sich folgende, in Tabelle 4-5 dargestellten Anforderungen zur Beschreibung der Flexibilität von Materialflusssystemen [Gün-02], [Gün-03b]. Alle anderen genannten Begriffe werden entweder synonym verwendet oder lassen sich auf die drei Kriterien Layout-, Fördergut- und Durchsatzflexibilität reduzieren.

Flexibilitätsart	Beschreibung
Layoutflexibilität	Vorab geplante Ortsveränderungen in der Fabrik müssen bedient werden können, bzw. eine Anpassung des Materialflusssystem an veränderte Materialflüsse ist möglich.
Durchsatzflexibilität	Der Durchsatz muss sich der geforderten, vorab festgelegten Produktionsleistung und –schwankung anpassen lassen.
Fördergutflexibilität	Vorab festgelegte Produktspektren (Abmessungen und Gewicht) bzw. -schwankungen müssen transportiert werden können.

Tabelle 4-5: Anforderungen an ein flexibles Materialflusssystem

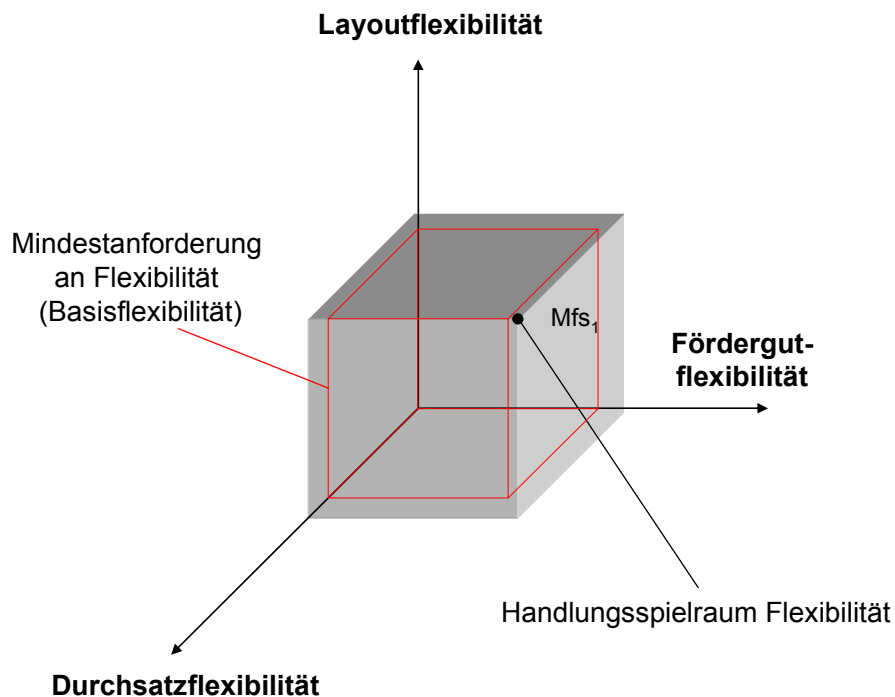


Abbildung 4-9: Darstellung der Flexibilität

Bei der Planung und Auslegung von Materialflusssystemen gilt es das notwendige Maß an Mindestflexibilität (= Basisflexibilität, vgl. Kap. 4.1.1) hinsichtlich Layout,

Durchsatz und Fördergut zu bestimmen, auf deren Größe das neue System ausgelegt werden muss. Die Basisflexibilität legt die Mindestanforderungen fest, die in Abbildung 4-9 anhand des eingezeichneten Drahtmodells dargestellt ist. Je nach Art des Materialflusssystems lassen sich in der Regel niemals genau die Mindestanforderungen erreichen, so dass in den meisten Fällen das System Leistungsreserven gegenüber dem Mindestniveau aufweist und somit mehr Handlungsspielraum als notwendig ist, zulässt.

Bei der Einplanung der erweiterten Flexibilität bedarf es einiger Vorüberlegungen, die bei der folgenden Abhandlung der Thematik Wandelbarkeit angestellt werden müssen.

Die beschriebenen Anforderungen und Eigenschaften von Materialflusssystemen beziehen sich auf das Systemverhalten hinsichtlich Flexibilität, d.h. die Reaktion auf vorab geplante Änderungen. Da es aber für Unternehmen zukünftig immer wichtiger wird, auch auf ungeplante und unvorhersehbare Veränderungen reagieren zu können, also wandelbar zu sein (siehe auch Kapitel 4.1.2), bedarf es einer Ergänzung der bisher genannten Eigenschaften.

### 4.2.2 Wandelbare Materialflusssysteme

Aus den vorangegangenen Definitionen für Eigenschaften flexibler Systeme lässt sich die Definition der Wandelbarkeit analog zur Flexibilitätsdefinition in der Erfüllung der Anforderungen nach Layout-, Durchsatz- und Fördergutflexibilität spezifizieren:

- **Fördergutflexibilität:**

Das System muss in der Lage sein, unterschiedlichste Produkte, unabhängig von deren Abmessung und Gewicht, transportieren zu können. Eine derartige Anforderung ist z.B. notwendig, falls ein Unternehmen sein Produktportfolio ändern muss, um neue Marktanteile zu sichern.

- **Layoutflexibilität:**

Jeder Ort in der Fabrik muss bedient werden können, bzw. das Materialflusssystem muss sich schnell auf veränderte Materialflüsse einstellen können. Eine Layoutveränderung kann z.B. durch den Einsatz neuer Produktionstechniken oder aufgrund starker Veränderungen der Transportbeziehungen zwischen einzelnen Fertigungseinrichtungen, die ein Umstellen dieser Systeme nach sich ziehen, erfolgen.

- **Durchsatzflexibilität:**

Durchsatzflexible Materialflusssysteme müssen sich allen Leistungsänderungen der Produktion, hervorgerufen z.B. durch neue Produkte oder extreme Nachfragesteigerungen, anpassen können.

Um zu gewährleisten, dass ein Materialflusssystem in der Lage ist, auf jedes ungeplante Ereignis bzw. jede Aufgabe reagieren zu können, also laut der vorangegangenen Definitionen wandelbar ist, müssten die drei Anforderungen Fördergut-, Layout- und Durchsatzflexibilität zu 100 Prozent erfüllt sein. Diese Forderung nach maximaler Wandelbarkeit ist aber, wie in Kapitel 4.1.3 dargestellt, wirtschaftlich nicht sinnvoll, da die Kosten für die Wandelbarkeit im Vergleich zum daraus resultierenden Nutzen überproportional steigen (vgl. Abbildung 4-5). Damit jedoch ein Materialflusssystem so gestaltet werden kann, dass eine Reaktion auf ungeplante Ereignisse möglich ist und trotzdem der Betrieb noch wirtschaftlich möglich, muss ein solches wandelbares System zusätzlich folgende Eigenschaften erfüllen:

- **Erweiterungsfähigkeit:**

Unter Erweiterungsfähigkeit wird allgemein die Möglichkeit verstanden, ein bestehendes Materialflusssystem durch Hinzufügen von systemeigenen Bauteilen und Fahrzeugen zu erweitern (vgl. Abbildung 4-10). Somit ist eine gezielte Erhöhung der drei Flexibilitätskriterien möglich, um damit das System auf die veränderten Anforderungen anpassen zu können. In Bezug auf die Layoutflexibilität sollen sowohl neue Hallenbereiche als auch zusätzliche Übergabepplätze innerhalb bestehender Bereiche bedient werden können.



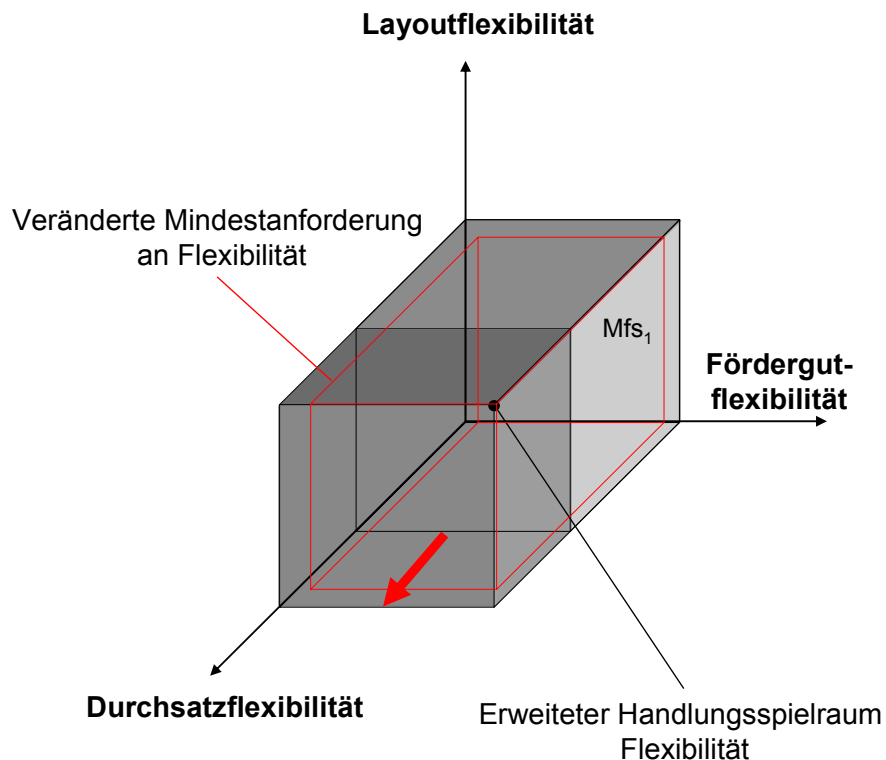


Abbildung 4-10: Anpassung der Flexibilität durch Erweiterung

Die Durchsatzflexibilität kann durch das Hinzufügen von systemeigenen Fahrzeugen ermöglicht werden, wogegen die Fördergutflexibilität z.B. durch den Austausch des Lastaufnahmemittels erreicht werden kann.

Besteht keine Möglichkeit das bestehende Materialflusssystem durch systemeigene Bauteile oder Fahrzeuge an die neuen Rahmenbedingungen anzupassen oder stellt diese Erweiterung eine wirtschaftlich nicht sinnvolle Lösung dar, muss in diesem Fall das Materialflusssystem durch weitere, fremde Systeme ergänzt werden. In diesem Fall wird von Integrationsfähigkeit neuer Materialflusssysteme gesprochen.

- **Integrationsfähigkeit:**

Die Integrationsfähigkeit beschreibt die Fähigkeit, technische und steuerungs-technische Verbindungen mit anderen Materialflusssystemen eingehen zu können und Materialflusssysteme auf steuerungs-technischer Seite in Leit- oder PPS-Systeme zu integrieren. In Ergänzung zur Erweiterungsfähigkeit bezieht sich die Integrationsfähigkeit deshalb auf das Hinzufügen von verschie-

denartigen Materialflusssystemen (vgl. Abbildung 4-11). Somit ist eine gezielte Erhöhung aller drei Flexibilitätskriterien möglich, um damit das System auf veränderte Anforderungen anpassen zu können, die vorab nicht geplant oder berücksichtigt wurden. Diese Integration soll unabhängig vom Materialflusssystem und Hersteller möglich sein. Um die Integrationsfähigkeit zu gewährleisten, ist es notwendig, dass die einzelnen Systeme über offene, standardisierte mechanische, elektrische und steuerungstechnische Schnittstellen, auch als standardisierte mechatronische Schnittstellen bezeichnet, verfügen.

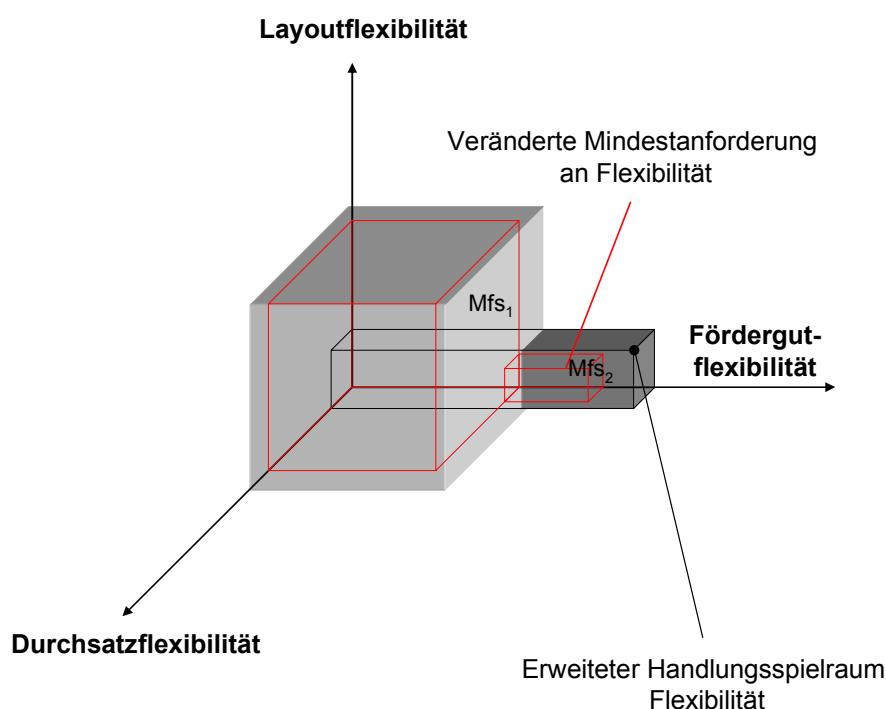


Abbildung 4-11: Anpassung der Flexibilität durch Integrationsfähigkeit

Die beiden beschriebenen Eigenschaften eines wandelbaren Materialflusssystems, Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit, spielen auch bei der Betrachtung der erweiterten Flexibilität (vgl. Kapitel 4.1.1) eine entscheidende Rolle und sind dabei eine notwendige Voraussetzung. Bei diesem Flexibilitätsanteil wird erst zu einem späteren Zeitpunkt, z.B. aus wirtschaftlichen Gründen, in die Erhöhung der Flexibilität investiert. Diese Aktivierung weiterer Flexibilitätspotenziale kann durch einen gezielten Ausbau des bestehenden Materialflusssystems erfolgen. Dieser Ausbau kann entweder mit systemeigenen Komponenten (= Erweiterungsfähigkeit) oder mit systemfremden Komponenten (= Integrationsfähigkeit) durchgeführt werden (vgl.

Abbildung 4-12). Welcher dieser beiden Möglichkeiten in Frage kommt, ist in vielen Fällen eine wirtschaftliche Entscheidung. Oftmals stellt der Ausbau eines Materialflusssystems durch systemfremde Komponenten die günstigere Möglichkeit dar, eventuellen Spitzen in der Produktion zu begegnen.

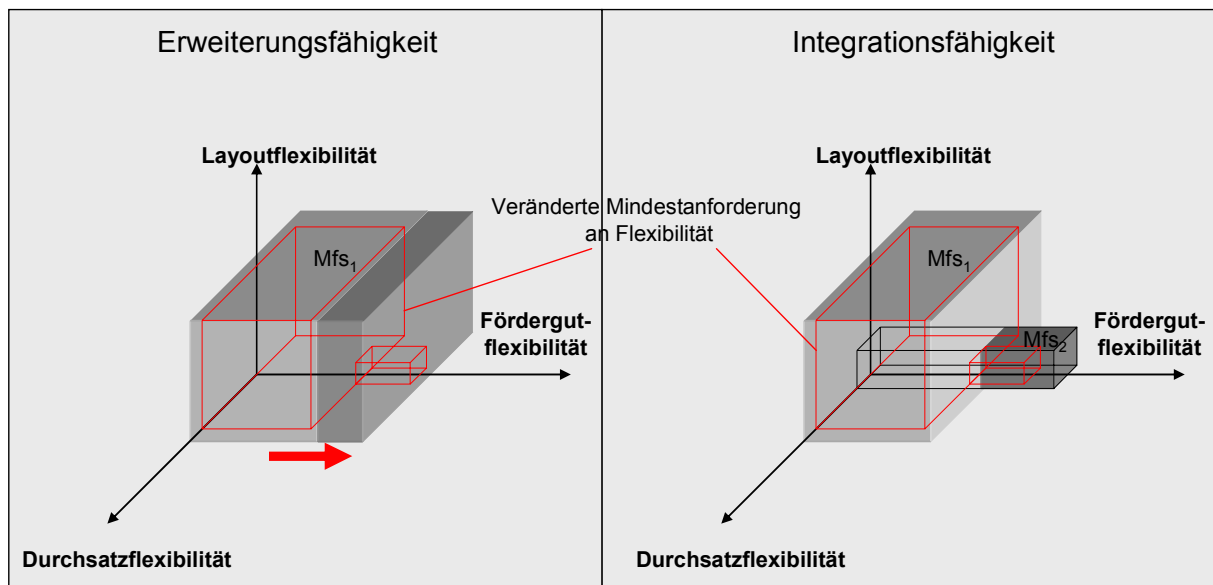


Abbildung 4-12: Vergleich Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit in Bezug auf Erhöhung der Fördergutflexibilität

Die Entscheidung, ob ein Materialflusssystem erweitert wird oder neue, systemfremde Komponenten integriert werden, spielt nicht nur bei der Betrachtung der erweiterten Flexibilität eine Rolle. Auch bei nicht planbaren Anpassungen ist es immer eine wichtige Entscheidung, wie und welchen Umfang das System angepasst bzw. ausgebaut werden kann. In vielen Fällen erfolgt diese Entscheidung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

### 4.3 Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen am Beispiel der Funktion „Transportieren“

Die in Kapitel 4.1 genannten Anforderungen an wandelbare Materialflusssysteme hinsichtlich Layout-, Durchsatz- und Fördergutflexibilität stellen eine für alle im Materialflusssystem auftretenden Funktionen eine allgemeingültige Beschreibung dar. Eine spezielle Bewertung und Auswahl von geeigneten Systemen ist aber auf Basis

einer allgemeingültigen Beschreibung nur schwer möglich. Aus diesem Grund müssen die drei Flexibilitätskriterien anhand von Kennzahlen konkret beschrieben werden, so dass diese in der Planungsphase zur Lösungsfindung eingesetzt werden können. Am Beispiel der Funktion „Transportieren“, die in einem Materialflusssystem eine entscheidende Rolle einnimmt, sollen spezielle Flexibilitätskriterien bestimmt werden.

### 4.3.1 Layoutflexibilität

Wert	Bezeichnung	Darstellung
1	Feste Verbindung und räumliche Fixierung der Übergabepunkte	
2	Übergabepunkte variabel innerhalb einer geraden Linie	
3	Übergabepunkte variabel innerhalb einer beliebiger Linie: – Variabel innerhalb fix vorgegebener Linie	
4	Übergabepunkte variabel innerhalb einer beliebiger Linie: – Variabel innerhalb zur Verfügung stehender Transportwege	
5	Übergabepunkte unabhängig vom Layout	

Abbildung 4-13: Flächenmäßige Betrachtung der Layoutflexibilität

### 4.3 Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen am Beispiel der Funktion „Transportieren“

Bei der Bestimmung der Layoutflexibilität kommt den Übergabepunkten oder -plätzen eine entscheidende Bedeutung zu. Die Übergabepunkte stellen dabei die Schnittpunkte zu einzelnen Fertigungs- bzw. Produktionsbereichen, Arbeitsplätzen oder zu anderen Materialflusssystemen dar. Für die Auswahl eines Materialflusssystems wird dabei die Anbindung der Übergabepunkte als Beurteilungskriterium herangezogen. Es wird dabei zwischen der Anbindung in der Ebene und der Höhe unterschieden. Bei der flächenmäßigen Betrachtung der Übergabepunkte kann von einer fixen Verbindung zwischen zwei Punkten bis hin zu einer komplett freien Anordnung der Übergabepunkte unterschieden werden (vgl. Abbildung 4-13). In Bezug auf die Höhe kann die Flexibilität nach fixer oder variabler Höhe der Übergabepunkte eingeteilt werden können (Abbildung 4-14).

Die in der Planungsphase zu treffende Entscheidung hinsichtlich der Anforderung an die Layoutflexibilität in Bezug auf die flächenmäßige Bedienung der Übergabepunkte ist von besonderer Bedeutung, da dieses Flexibilitätspotenzial damit weitgehend festgelegt ist. In vielen Fällen kann das Potenzial in Bezug auf die Layoutflexibilität nur mit entsprechendem Aufwand an die neuen Anforderungen angepasst werden. Eine Erhöhung der Layoutflexibilität bei der flächenmäßigen Betrachtungsweise zieht in der Regel bautechnische Veränderungen nach sich und ist somit mit teilweise erheblichen Kosten verbunden.

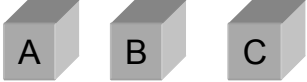
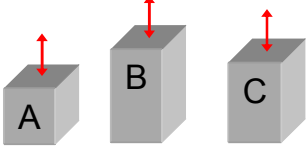
Wert	Bezeichnung	Darstellung
<b>1</b>	Übergabepunkte in der Höhe fix	
<b>2</b>	Übergabepunkte in der Höhe variabel	

Abbildung 4-14: Höhenmäßige Betrachtung der Layoutflexibilität

Eine Kategorisierung wichtiger Transportmittel, die in Materialflusssystemen vermehrt zum Einsatz kommen, nach den beiden Kriterien der Layoutflexibilität „Fläche“

und „Höhe“, ist in der Tabelle 4-6 dargestellt. Für die Kategorie „Übergabepunkte unabhängig vom Layout und fixe Höhe“ lässt sich keines der bestehenden Fördermittel einordnen, da eine solche Layoutflexibilität nur durch eine Bedienung von oben ermöglicht wird und somit in der Höhe variabel ist.

		Kriterium Höhe	
		1	2
Kriterium Fläche	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rollenbahn angetrieben (Automatischer Betrieb)</li> <li>• Tragkettenförderer</li> <li>• Gurtförderer (Automatischer Betrieb)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etagenförderer</li> <li>• S- Förderer</li> <li>• Teleskopgurtförderer</li> </ul>
	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rollenbahn angetrieben (Manueller Betrieb)</li> <li>• Gurtförderer (Manueller Betrieb)</li> <li>• Querverschiebewagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regalbediengerät</li> </ul>
	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FTS (ohne Hubplattform)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektronhängebahn</li> <li>• FTS (mit Hubplattform)</li> </ul>
	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schlepper</li> <li>• Hubwagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stapler</li> <li>• Knickarmroboter</li> </ul>
	5		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brückenkran</li> <li>• Flächenportalroboter</li> </ul>

Tabelle 4-6: Kategorisierung wichtiger Transportmittel hinsichtlich Layoutflexibilität

### 4.3.2 Durchsatzflexibilität

Die Durchsatzflexibilität lässt sich anhand des maximal möglichen Durchsatzes beschreiben bzw. durch die Leistungsreserve des betrachteten Materialflusssystems:

$$\text{Durchsatzflexibilität} = \frac{\text{IST Durchsatz}(TE / h)}{\text{Maximaler Durchsatz}(TE / h)}$$

Die Bemessung des Durchsatzes erfolgt dabei in Transporteinheiten (TE) pro Zeiteinheit und ist äquivalent zum Auslastungsgrad eines Systems. In diesem Zusammenhang gilt es zu berücksichtigen, dass der Durchsatz in einem System nicht belie-

### 4.3 Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen am Beispiel der Funktion „Transportieren“

big gesteigert werden kann, um eine hohe Durchsatzflexibilität zu realisieren, da ansonsten die Effizienz und ein wirtschaftlicher Betrieb nicht mehr gewährleistet ist.

Neben der Betrachtung des maximal möglichen Durchsatzes spielt bei der Bewertung der Durchsatzflexibilität die Richtung des Materialflusses bei der Auswahl eine weitere entscheidende Rolle. Dabei wird unterschieden, ob das eingesetzte Materialflusssystem nur in einer Richtung die Transporteinheiten befördern kann, oder ob ein richtungsunabhängiger Transport möglich ist (vgl. Abbildung 4-15). Falls die Reihenfolge der einzelnen Prozessschritte je nach Auftrag stark variiert und somit sich keine starre Reihenfolge ergibt, ist es von Vorteil, dass ein Materialflusssystem in beiden Richtungen fördern kann, um kurze Wege zwischen den einzelnen Produktionseinrichtungen zu realisieren.

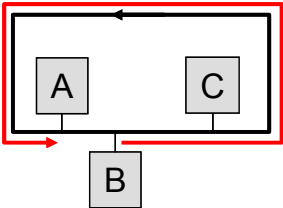
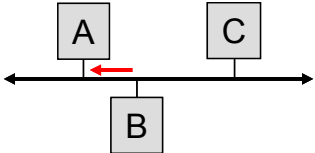
Wert	Bezeichnung	Darstellung
1	Materialfluss in einer Richtung	
2	Materialfluss richtungsunabhängig	

Abbildung 4-15: Durchsatzflexibilität unter Berücksichtigung der Materialflussrichtung („Richtungsabhängigkeit“)

Eine Kategorisierung wichtiger Transportmittel, die in Materialflusssystemen vermehrt zum Einsatz kommen, ist in Tabelle 4-7, nach dem Kriterium der Durchsatzflexibilität „Richtungsabhängigkeit“ strukturiert, dargestellt.

Wert	Transportmittel
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Power and Free –Förderer</li> <li>• Rollenbahn</li> <li>• Gurtförderer</li> <li>• ...</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regalbediengerät</li> <li>• Querverschiebewagen</li> <li>• Stapler</li> <li>• Fahrerloses Transportsystem</li> <li>• Brückenkran</li> <li>• EHB</li> <li>• ...</li> </ul>

Tabelle 4-7: Kategorisierung wichtiger Transportmittel hinsichtlich „Richtungsabhängigkeit“

Im Vergleich zur Layoutflexibilität besteht bei der Betrachtung der Durchsatzflexibilität mehr Handlungsspielraum, das in der Planungsphase festgelegte Potenzial zu erhöhen. In Tabelle 4-8 sind einige Kriterien aufgestellt, um die Durchsatzflexibilität bei bestehenden Materialflusssystemen zu erhöhen und somit die Voraussetzung für wandelbare Materialflusssysteme zu bilden.



### 4.3 Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen am Beispiel der Funktion „Transportieren“

Kriterium	Ausprägungsart
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geschwindigkeit der Fördermittel erhöhen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung der Fahr- und Hubgeschwindigkeiten</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung der Fördermittellanzahl</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hinzufügen zusätzlicher Übergabepplätze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erzeugen von Zwischenpufferplätzen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alternative/kürzere Wegstrecken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hinzufügen neuer / Veränderung bestehender Wegstrecken</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variation der Anzahl der zu befördernden Transporteinheiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Austausch des Lastaufnahmemittels</li> </ul>

Tabelle 4-8: Kriterien zur Erhöhung der Durchsatzflexibilität

Eine Möglichkeit den Durchsatz zu steigern kann durch die Erhöhung der Geschwindigkeit eines Transportmittels geschehen. Dabei kann sowohl die Fahrzeuggeschwindigkeit als auch die Hub- oder Senkgeschwindigkeit variieren. Die Erhöhung der Geschwindigkeiten kann als problematisch gelten, da eine Vielzahl an Änderungen betroffen sind. So müssen z.B. die bestehenden Sicherheitskonzepte angepasst werden, was wiederum Aufwand und Kosten verursachen kann. Diese Möglichkeit wird eher selten angewandt.

Eine weitaus effektivere Methode zur Durchsatzsteigerung stellt die Erhöhung der Anzahl der eingesetzten Transportmittel dar. Dabei gilt es aber zu beachten, dass die Anzahl nicht beliebig erweiterbar ist, da sich ansonsten die Transportmittel gegenseitig beeinflussen können.

Besteht in einem Materialflusssystem die Möglichkeit der Erweiterung um neue Übergabepplätze, kann dadurch eine Durchsatzsteigerung erzielt werden. Wird ein Auftrag z.B. nicht weiter bearbeitet, da die nächste Bearbeitungsstation noch nicht bereit ist, kann dann unter Verwendung eines zusätzlichen Übergabepplatzes der durchzuführende Auftrag zwischengepuffert werden. Folgeaufträge, falls diese nicht auf dieselbe Bearbeitungsmaschine warten, können damit vorgezogen werden, wo-

durch unnötige Stillstandzeiten vermieden werden. Die Folge daraus ist eine kürzere Durchlaufzeit und damit verbunden ein höherer Durchsatz.

Aufgrund der starken Turbulenzen, denen die Produktionssysteme ausgesetzt sind, kann es zu Veränderungen in den Produktionsabläufen kommen. Die Materialflusssysteme, die auf einen Betriebszustand ausgelegt worden sind, können nicht mehr optimal genutzt werden. Durch die Möglichkeit der Schaffung von alternativen und kürzeren Wegstrecken kann der Durchsatz wieder gesteigert und die Abläufe des Materialflusssystems wieder an den optimalen Betriebszustand angepasst werden. Da diese Möglichkeit im Wesentlichen durch das Hinzufügen neuer bzw. die Veränderung bestehender Wegstrecken besteht, spielt die Layoutflexibilität bei dieser Art der Durchsatzsteigerung eine besondere Rolle.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung des Durchsatzes ist die Variation der pro Transportmittel zu befördernden Transporteinheiten. Durch Austausch des Lastaufnahmemittels kann die Anzahl der Transporteinheiten erhöht werden und somit eine Steigerung des Durchsatzes erfolgen.

### **4.3.3 Fördergutflexibilität**

Bei der Betrachtung der Fördergutflexibilität, die den Transport unterschiedlicher Produkte hinsichtlich Größe und Gewicht gewährleistet, werden folgende zwei Kriterien zur Bewertung herangezogen:

- Verwendung von Standardladehilfsmitteln
- Flexibilität des Greifbildes eines Lastaufnahmemittels

#### **Verwendung von Standardladehilfsmittel**

Durch den Einsatz von standardisierten Ladehilfsmitteln ist ein flexibler Transport der Güter innerhalb des vorgegebenen Abmaßes und Gewichtes gewährleistet. Die Flexibilität bezieht sich in diesem Fall auf das Transportgut. In der Planungsphase wird ausgehend von den Daten der zu transportierenden Produkte mit den eventuell auftretenden Schwankungen das passende Ladehilfsmittel ausgewählt (vgl. Abbildung 4-16). Innerhalb der Grenzen der ausgewählten Ladehilfsmittel ist das Materialflusssystem flexibel.

### 4.3 Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen am Beispiel der Funktion „Transportieren“

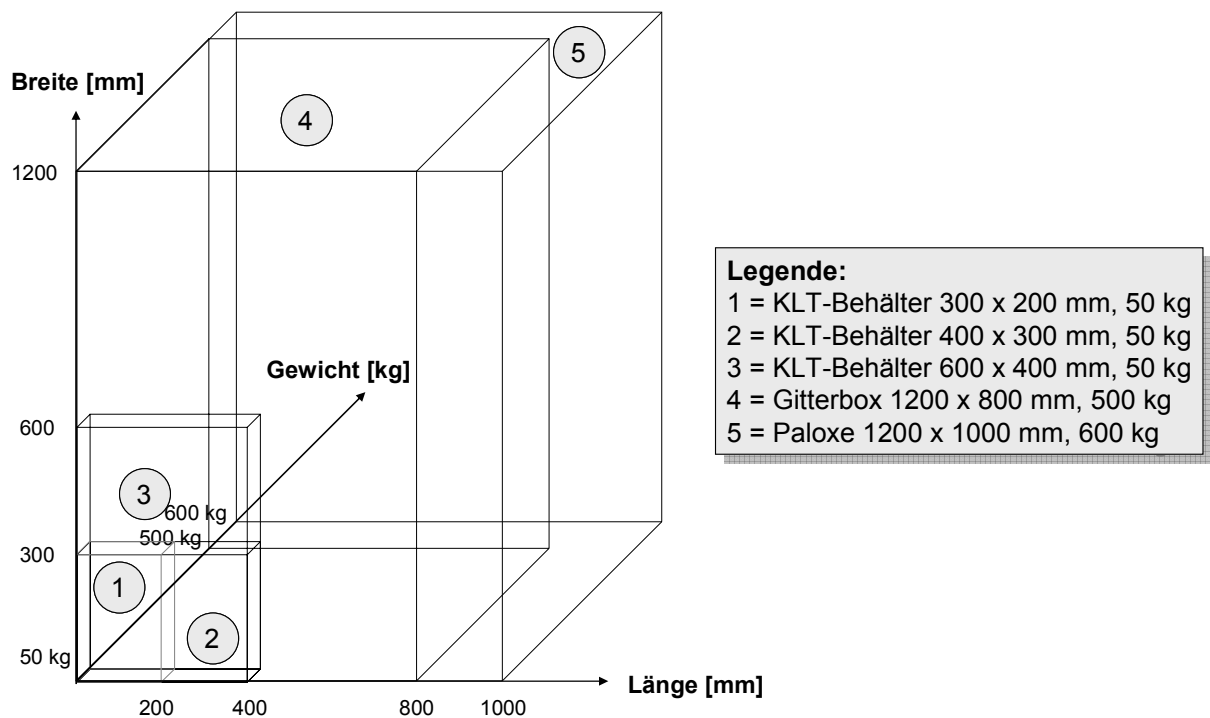


Abbildung 4-16: Einteilung der Ladehilfsmittel nach Abmaße und Gewicht am Beispiel geschlossener Behälter

#### Flexibilität des Greifbildes

Durch die Verwendung eines standardisierten Ladehilfsmittels ist die Flexibilität innerhalb der Transportgüter gewährleistet. Da in einem Materialflusssystem unter Umständen unterschiedliche Behältergrößen auftreten können, bzw. der Einsatz weiterer Behältertypen zukünftig geplant wird, ist die Bewertung der Fördergutflexibilität hinsichtlich der Flexibilität des Greifbildes eines Lastaufnahmemittels sinnvoll. So können mit einem einzigen Lastaufnahmemittel unterschiedliche Behältergrößen gehandelt werden.

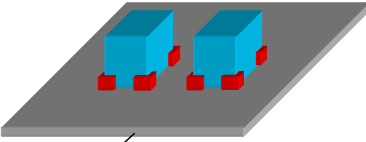
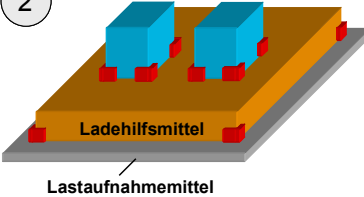
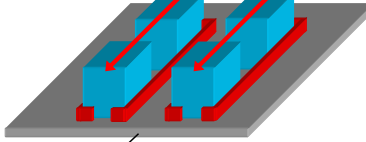
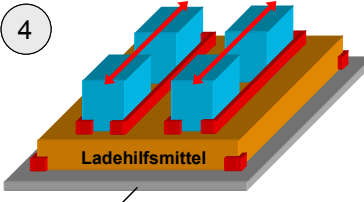
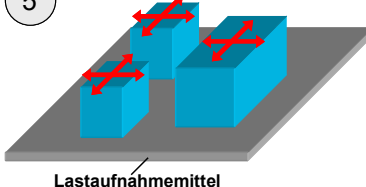
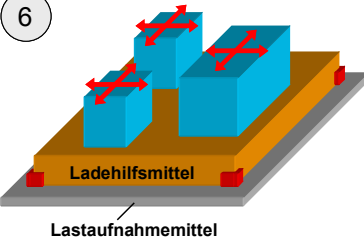
Behälter- handling Anzahl und Größe	Durch Lastaufnahmemittel selber	Durch zusätzliches Ladehilfsmittel
Anzahl und Größe fest	<p>1</p>  <p>Lastaufnahmemittel</p>	<p>2</p>  <p>Ladehilfsmittel</p> <p>Lastaufnahmemittel</p>
Anzahl und Größe variabel (1-D)	<p>3</p>  <p>Lastaufnahmemittel</p>	<p>4</p>  <p>Ladehilfsmittel</p> <p>Lastaufnahmemittel</p>
Anzahl und Größe variabel (2-D)	<p>5</p>  <p>Lastaufnahmemittel</p>	<p>6</p>  <p>Ladehilfsmittel</p> <p>Lastaufnahmemittel</p>

Abbildung 4-17: Kriterien bei der Bewertung der Flexibilität des Greifbildes

Bei der Bewertung wird dabei zuerst unterschieden, ob das Lastaufnahmemittel unterschiedliche Behälter direkt aufnehmen kann, oder ob ein zusätzliches Ladehilfsmittel z.B. in Form einer Trägerpalette notwendig ist. Auf Basis dieser Unterteilung kann anschließend als Maß für die Flexibilität des Greiferbildes die Anzahl der unterschiedlichen transportierbaren Behältergrößen bestimmt werden (vgl. Abbildung 4-17).

### 4.3 Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen am Beispiel der Funktion „Transportieren“



Abbildung 4-18: Ausführungsbeispiele für die Kategorisierung der Flexibilität des Greifbildes

Falls das eingeplante Flexibilitätspotenzial bei der Betrachtung des Förderguts nicht mehr ausreicht, gilt es durch geeignete Maßnahmen das bestehende Materialflusssystem zu erweitern und an die neuen Anforderungen anzupassen. Eine geeignete Maßnahme stellt der Austausch des Lastaufnahmemittels dar. Das Transportmittel an sich bleibt unverändert, so dass nur das Lastaufnahmemittel ausgetauscht werden muss. So ist eine schnelle und aufwandsarme Anpassung an neue Ladehilfsmittel möglich. In diesem Fall gilt es zu berücksichtigen, dass bei einer Veränderung des Lastaufnahmemittels auch die Übergabeplätze angepasst werden müssen.

### 4.3.4 Wandelbarkeitspotenzial

Falls das eingeplante Flexibilitätspotenzial nicht ausreicht, bedarf es einer Erweiterung des bestehenden Systems oder der Integration anderer Materialflusssysteme (= Wandelbarkeit). Für die Erweiterung des bestehenden Systems mit eigenen Komponenten wurde ein Maßnahmenkatalog an die eingesetzte Materialflusstechnik erarbeitet.

Aufgrund der nicht planbaren Turbulenzen ist es aber schwierig bis ausgeschlossen, eine konkrete Bestimmung in Form von einer quantitativen Bewertungszahl, analog zu den Flexibilitätskriterien, zu geben. Um dennoch eine Einteilung und Bewertung von einzelnen Materialflusssystemen in Bezug auf die Wandelbarkeit vornehmen zu können, wird der Weg einer Potenzialbetrachtung besprochen. Ziel dieses Ansatzes ist es, dem Planer ein Hilfsmittel zur Hand zu geben, das den Aufwand zur Anpassung der einzelnen Flexibilitätskriterien Fördergut-, Durchsatz- und Layoutflexibilität an die neuen Anforderungen bestimmt und somit das Wandelbarkeitspotenzial eines Systems abschätzt.

Die Bestimmung und Abschätzung des Wandelbarkeitspotenzials erfolgt innerhalb von vier Schritten, die in Abbildung 4-19 dargestellt sind. In einem ersten Schritt (Nummer 1) wird ein konkreter Maßnahmenkatalog für wandelbare Materialflusssysteme festgelegt, mit dem das betrachtete System auf die neuen Anforderungen reagieren kann. Diese Kriterien werden dann in direkten Bezug zu den Flexibilitätskriterien gestellt. Da diese Kriterien oftmals sich auf mehrere der drei Flexibilitätsarten Layout-, Fördergut- und Durchsatzflexibilität auswirken, wird in einem zweiten Schritt (Nummer 2) dieser Einfluss gewichtet. Die Gewichtungsskala reicht dabei von keinen Einfluss (Wert: 0) über indirekten Einfluss (Wert: 1) bis hin zu direkten Einfluss (Wert: 2).

### 4.3 Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen am Beispiel der Funktion „Transportieren“

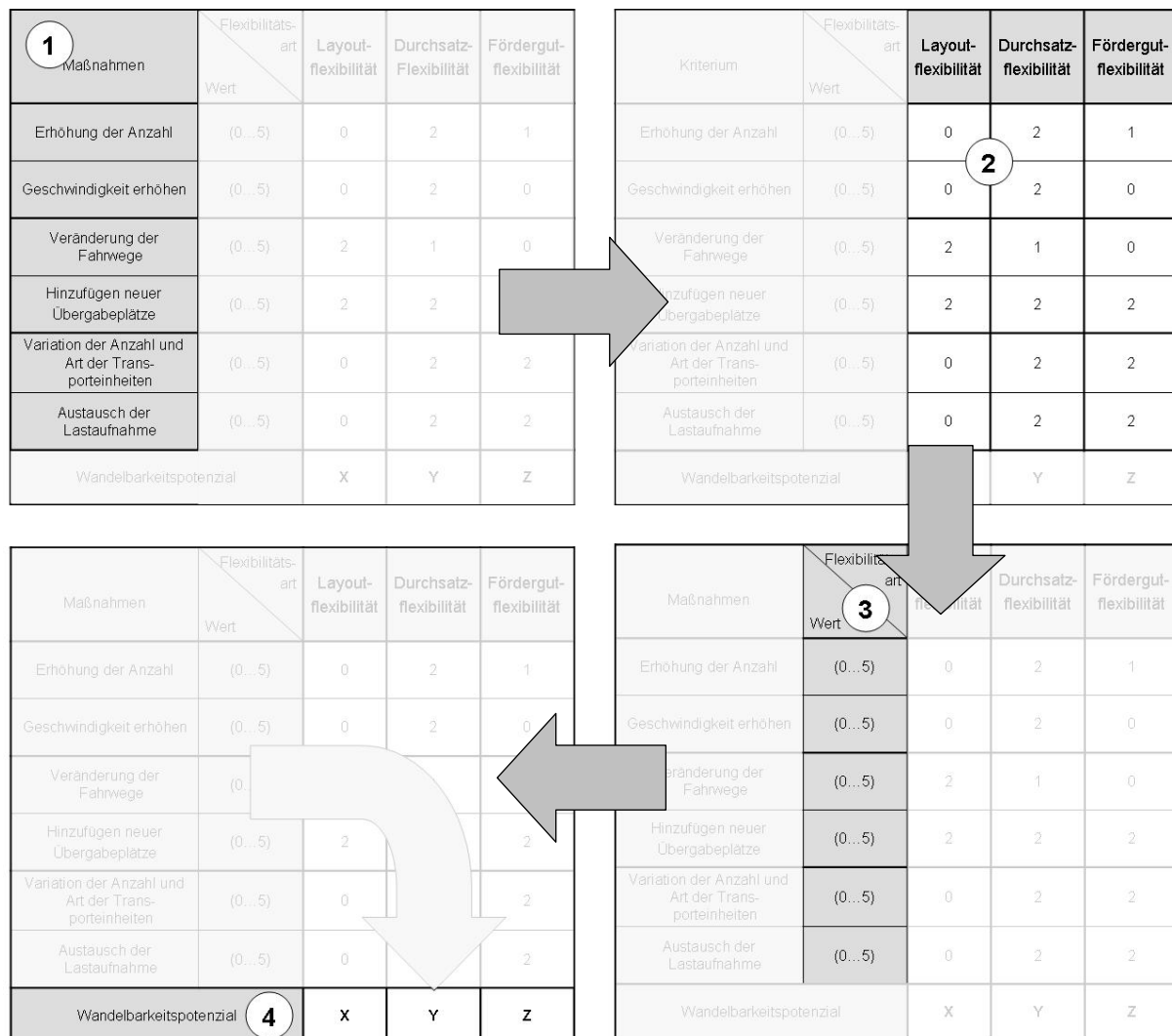


Abbildung 4-19: Vorgehensweise bei der Potenzialabschätzung von wandelbaren Materialflusssystemen

Beispielhaft an der Materialflussfunktion „Transportieren“ sind in Tabelle 4-9 alle genannten Maßnahmen und deren Einfluss auf die Flexibilitätsarten zusammengefasst. Die aufgeführten Anforderungen werden dabei nach den Bestandteilen eines Transportsystems in die Bereiche Transportmittel, Transportprozess und Transporteinheit untergliedert (vgl. Kapitel 3.1.2.1). Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben hat nur der Transportprozess, also die Wahl des Transportweges Einfluss auf die Layoutflexibilität. Auf eine Veränderung der Fördergutflexibilität hat neben der reinen Transporteinheit auch das Transportmittel bedingt Einfluss, da durch eine Erhöhung der Anzahl zusätzliche Transportmittel eingesetzt werden können, die mit

anderen Lastaufnahmemitteln ausgestattet sind. Den meisten Handlungsspielraum hat man bei einer Veränderung der Durchsatzflexibilität, da alle Bereiche direkten oder indirekten Einfluss auf dieses Kriterium nehmen.

Bestandteile eines Transportsystems	Flexibilitätsart	Layoutflexibilität	Durchsatzflexibilität	Fördergutflexibilität
	Maßnahmen			
Transportmittel	Erhöhung der Anzahl	○	●	◐
	Geschwindigkeit erhöhen	○	●	○
Transportprozess	Veränderung der Fahrwege	●	◐	○
	Hinzufügen neuer Übergabeplätze	●	●	●
Transporteinheit	Variation der Anzahl und Art der Transporteinheiten	○	●	●
	Austausch der Lastaufnahme	○	●	●

○	Kein Einfluss	(Wert: 0)
◐	Indirekter Einfluss	(Wert: 1)
●	Direkter Einfluss	(Wert: 2)

Tabelle 4-9: Anforderungen an wandelbare Materialflusssysteme am Beispiel Transportieren mit Einfluss auf die Flexibilitätsarten

In einem dritten Schritt (Nummer 3) erfolgt die eigentliche Abschätzung des Wandelbarkeitspotenzials des betrachteten Materialflusssystems. Auf Basis des aus Nummer 1 erarbeiteten Maßnahmenkataloges wird für die einzelnen Systeme die technische Machbarkeit abgeschätzt. Die Bewertung erfolgt anhand der Skala von Wert 0 bis zum Wert 5. Der höchste Wert bedeutet in diesem Fall, dass der Erfüllungsgrad dieses Kriteriums und die technische Machbarkeit am höchsten bewertet werden.

Der letzte, vierte Schritt (Nummer 4) stellt die Berechnung der Potenzialwerte der einzelnen Flexibilitätskriterien dar. Dabei werden die einzelnen Werte (aus Nummer



### 4.3 Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen am Beispiel der Funktion „Transportieren“

3) des Maßnahmenkataloges mit den Einflusswerten (aus Nummer 2) multipliziert und für das jeweilige Flexibilitätskriterium aufsummiert. Für jedes Flexibilitätskriterium ergibt sich daraus ein Wert, der das jeweilige Potenzial zur Erhöhung der Flexibilität angibt. Somit besteht nunmehr die Möglichkeit, einzelne Materialflusssysteme hinsichtlich der Potenzialerhöhung der einzelnen Flexibilitätskriterien miteinander zu vergleichen.

Am Beispiel der beiden Materialflusssysteme Rollenbahn und Elektrohängebahn soll für die Funktion Transportieren eine Abschätzung des Wandelbarkeitspotenzials durchgeführt werden (vgl. Abbildung 4-20).

Rollenbahn					Elektrohängebahn				
Maßnahmen	Flexibilitätsart	Layoutflexibilität	Durchsatzflexibilität	Fördergutflexibilität	Maßnahmen	Flexibilitätsart	Layoutflexibilität	Durchsatzflexibilität	Fördergutflexibilität
	Wert					Wert			
Erhöhung der Anzahl	0	0	2	1	Erhöhung der Anzahl	4	0	2	1
Geschwindigkeit erhöhen	2	0	2	0	Geschwindigkeit erhöhen	2	0	2	0
Veränderung der Fahrwege	3	2	1	0	Veränderung der Fahrwege	3	2	1	0
Hinzufügen neuer Übergabepunkte	3	2	2	2	Hinzufügen neuer Übergabepunkte	5	2	2	2
Variation der Anzahl und Art der Transporteinheiten	3	0	2	2	Variation der Anzahl und Art der Transporteinheiten	3	0	2	2
Austausch der Lastaufnahme	0	0	2	2	Austausch der Lastaufnahme	5	0	2	2
Wandelbarkeitspotenzial		<b>12</b>	<b>19</b>	<b>12</b>	Wandelbarkeitspotenzial		<b>16</b>	<b>41</b>	<b>30</b>

Abbildung 4-20: Abschätzung des Wandelbarkeitspotenzials bei einer Rollenbahn und einer Elektrohängebahn

Im Vergleich zur Rollenbahn besteht bei einer Elektrohängebahn in der Regel noch Erweiterungspotenzial durch Erhöhung der Anzahl der Transportmittel (Wert: 4). Bei einer Rollenbahn ist eine derartige Potenzialerweiterung nicht möglich (Wert: 0). Die Erhöhung der Geschwindigkeit der Transportmittel ist bei beiden betrachteten Systemen bedingt möglich (Wert: 2).

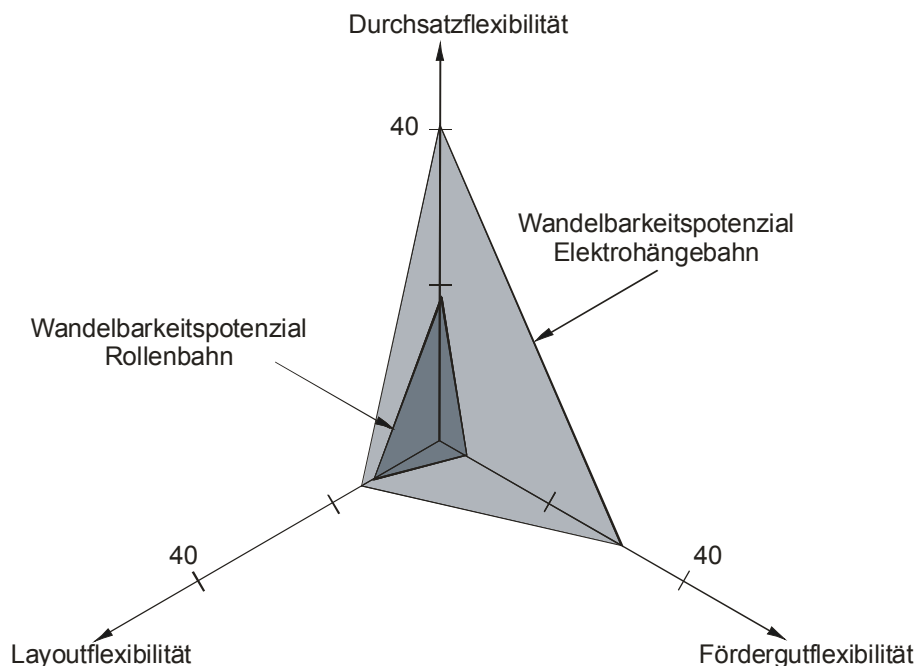


Abbildung 4-21: Graphische Darstellung des Wandelbarkeitspotenzials bei einer Rollenbahn und einer Elektrohängebahn

Die Veränderung der Fahrwege gestaltet sich bei beiden Systemen als schwierig. Das Hinzufügen von Übergabepätzen ist bei einer Elektrohängebahn ohne größeren technischen Aufwand realisierbar (Wert: 5). Bei der Rollenbahn gestaltet sich dieses Unterfangen als wesentlich schwieriger, da in der Regel in das bestehende System Ausschleusstrecken eingebaut werden und somit Umbaumaßnahmen am gesamten System erfolgen müssen (Wert: 3).

Durch den Einsatz von Trägerpaletten kann bei beiden Systemen die Anzahl und Art der transportierten Einheiten bis zu einem gewissen Maße erhöht werden (Wert: 3). Bei einer Elektrohängebahn kann das Lastaufnahmemittel austauschbar gestaltet werden (Wert: 5) und punktet so gegenüber der Rollenbahn (Wert: 0), bei der das Potenzial durch die Rollenbreite festgelegt ist und somit nicht veränderbar ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Rollenbahn nur in dem Punkt Layoutflexibilität in etwa gleich abschneidet, die Elektrohängebahn bei den Kriterien Durchsatz- und Fördergutflexibilität mit Abstand die besseren Voraussetzungen bietet, um bei diesen Kriterien die Flexibilität zu erhöhen. Das abgeschätzte Wandelbarkeitspotenzial für beide Systeme ist in Abbildung 4-21 graphisch aufbereitet.

### 4.3 Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen am Beispiel der Funktion „Transportieren“

		Layout- flexibilität	Durchsatz- flexibilität	Fördergut- flexibilität
<b>1</b>	Brückenkran	10	34	28
<b>2</b>	EHB	16	41	30
<b>3</b>	Flächenportalroboter	10	34	28
<b>4</b>	FTS (optische Spurführung)	16	40	28
<b>5</b>	FTS (induktive Spurführung)	12	38	28
<b>6</b>	Gabelstapler	20	51	35
<b>7</b>	Power and Free	14	40	30
<b>8</b>	Querverschiebewagen	8	28	22
<b>9</b>	Regalbediengerät	10	32	26
<b>10</b>	Rollenbahn (angetrieben)	12	19	12

Tabelle 4-10: Wandelbarkeitspotenzial für ausgewählte Transportmittel

Die exemplarisch an den beiden Transportmitteln Elektrohängebahn und Rollenbahn durchgeführte Methode zur Bestimmung des Wandelbarkeitspotenzials wurde für weitere ausgewählte Systeme, die vermehrt in flexiblen Systemen eingesetzt werden, durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchung und die ermittelten Einzelwerte für das Wandelbarkeitspotenzial sind in Tabelle 4-10 und Abbildung 4-22 dargestellt.

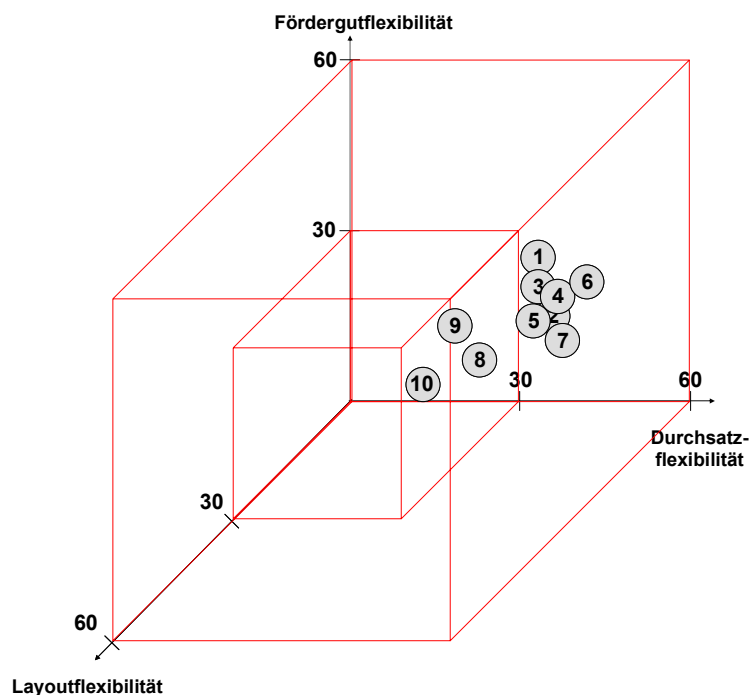


Abbildung 4-22: Graphische Darstellung des ermittelten Wandelbarkeitspotenzial für ausgewählte Transportmittel

Der Gabelstapler stellt immer noch das flexibelste Transportmittel dar, das in Materialflusssystemen eingesetzt werden kann. Bei allen drei Flexibilitätsarten erzielt der Gabelstapler Höchstwerte. In Bezug auf das Wandelbarkeitspotenzial bei Fördergut- und Layoutflexibilität erzielen die beiden Systeme EHB und FTS ebenfalls sehr hohe Werte. Bei der Layoutflexibilität sind beide Systeme im Vergleich zum Gabelstapler eingeschränkt, wobei in letzter Zeit intensive Bemühungen durchgeführt werden, z.B. durch Lasernavigation bei FTS, auch in diesem Punkt höhere Werte zu erzielen.

Die Bestimmung des Wandelbarkeitspotenzials ist eine subjektive Methode und erhebt keinesfalls den Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Mit der geschaffenen Methode besteht die Möglichkeit, bei der Auswahl und Planung von Materialflusssystemen für den konkreten Anwendungsfall das Wandelbarkeitspotenzial als ein weiches Kriterium in die Bewertung mit einfließen zu lassen. Somit kann in gewisser Weise die Reaktion und die Möglichkeiten des betrachteten Systems bei Eintreten ungeplanter Ereignisse überprüft werden. Die hier vorgestellte Methodik für die Funktion „Transportieren“ lässt sich auch auf alle anderen Funktionen übertragen.

Die entwickelte Methode zur Bestimmung des Wandelbarkeitspotenzials kann darüber hinaus zur Schwachstellenanalyse der untersuchten Materialflusssysteme herangezogen werden. Somit ist es möglich die Reaktionsfähigkeit des Systems in Bezug auf die drei Flexibilitätsarten Fördergut, Layout und Durchsatz zu überprüfen und davon gezielt Optimierungspotenziale abzuleiten.

### **4.4 Zusammenfassung**

Bei der Bewertung der Flexibilität kristallisieren sich die Anforderungen nach Layout-, Fördergut- und Durchsatzflexibilität heraus. Damit ein System wandelbar ist, also auf alle ungeplanten Ereignisse reagieren kann, müssten diese drei Anforderungen zu 100% erfüllt sein. Ein wirtschaftlicher Betrieb, wie in Kapitel 4.1.3 ausführlich dargestellt, wäre aber damit nicht mehr möglich. Somit müssen Materialflusssysteme die Eigenschaft aufweisen, durch systemeigene Komponenten erweitert (Erweiterungsfähigkeit) oder durch andere, verschiedenartige Systeme neu ergänzt zu werden (Integrationsfähigkeit). Welche dieser beiden Methoden angewandt wird, um das Flexibilitätspotenzial an die neuen Anforderungen anzupassen, ist am Ende eine Frage der Wirtschaftlichkeit. Eine Auswahl von Materialflusssystemen erfolgt in der Grobplanungsphase demzufolge zuerst anhand der Mindestflexibilitätsanforderungen, die auf in der Zukunft geplanten Ereignissen beruhen und somit vorhersehbar sind. Dabei wird nochmals unterschieden, ob in die Flexibilität sofort investiert wird, oder ob z.B. aus wirtschaftlichen Gründen diese Mindestflexibilität erst später aktiviert wird. In diesem Fall spricht man von erweiterter Flexibilität. Die Aktivierung kann durch systemeigene Komponenten oder durch den Einsatz systemfremder Materialflusssysteme erfolgen. Falls im laufenden Betrieb zu einem späteren Zeitpunkt dieses vorgegebene Potenzial nicht mehr ausreicht, bedarf es einer Anpassung des bestehenden Systems durch die Eigenschaften „Erweiterungsfähigkeit“ und „Integrationsfähigkeit“. Durch diese Fähigkeiten ist ein wandelbares Materialflusssystem charakterisiert.

Am Beispiel der Materialflussfunktion „Transportieren“ wurden Kriterien für die Bewertung der Layout-, Durchsatz- und Fördergutflexibilität vorgestellt. Mit Hilfe dieser Kriterien ist es in der Planungsphase möglich, anhand der geforderten Flexibilität eine Vorauswahl der zur Verfügung stehenden Materialflusssysteme zu treffen.

Falls das geplante Flexibilitätspotenzial nicht ausreicht, bedarf es einer Erweiterung des bestehenden Systems oder der Integration anderer Materialflusssysteme (= Wandelbarkeit). Für die Erweiterung des bestehenden Systems mit eigenen Komponenten wurde ein Maßnahmenkatalog für die eingesetzte Materialflusstechnik erarbeitet.

Auf Basis der beschriebenen Anforderungen an wandelbare Materialflusssysteme gilt es bei der weiteren Vorgehensweise geeignete Konzepte für die Gestaltung von zukünftigen Systemen zu erarbeiten. Ein Ansatzpunkt stellt dabei die Methode der Modularisierung dar. Grundidee ist dabei, das Materialflusssystem aus einzelnen Modulen zusammensetzen und somit die geforderte Mindestflexibilität zu erreichen. Falls eine Erhöhung der Flexibilität erforderlich ist, können dann einzelne Module ausgetauscht und somit gezielt die einzelnen Flexibilitätsarten verändert werden.

# 5 Modularisierungsmethodik

## 5.1 Allgemeine Systemtheorie

Vor der Ableitung der Methode zur Gestaltung wandelbarer Materialflusssysteme ist es hilfreich, den Betrachtungsgegenstand genauer abzugrenzen. Dazu bietet es sich an, ihn auf abstrakte, möglichst allgemeingültige Weise zu beschreiben, um dadurch einen unverstellten Blick zu ermöglichen. Eine Möglichkeit für eine solche Beschreibung bietet die Systemtechnik an, die im Folgenden näher beschrieben werden soll [Rop-99].

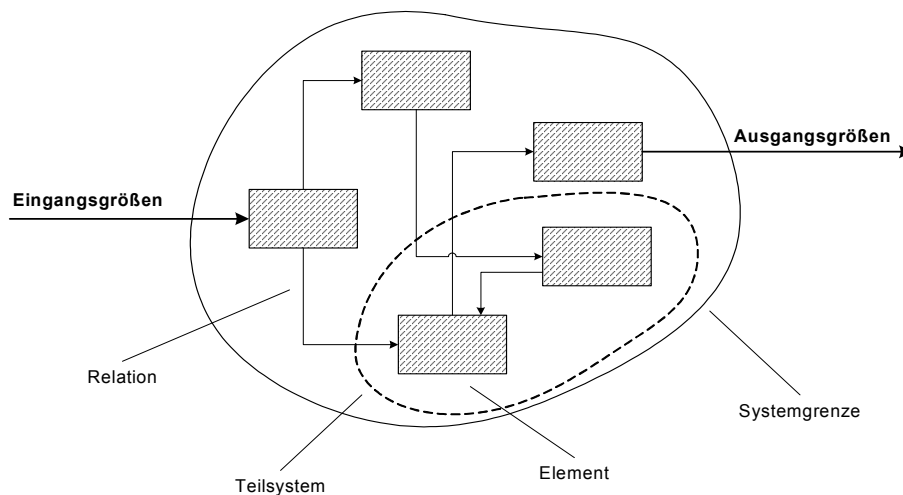


Abbildung 5-1: Ein allgemeines System (nach [Rop-99])

Ein System besteht aus einer Menge von Elementen, die miteinander durch Relationen in Beziehung stehen. Es ist durch eine Systemgrenze von seiner Umwelt abgegrenzt (siehe Abbildung 5-1). Die Elemente, die das System bilden, können wiederum als eigenständige Systeme betrachtet werden, ebenso wie das Gesamtsystem bei Erweiterung des Betrachtungshorizonts als Teilsystem eines übergeordneten Systems angesehen werden kann. So entsteht eine hierarchische Sicht auf das System, die es erlaubt, den für den jeweiligen Einsatzzweck geeigneten Grad der Auflösung zu wählen. Charakterisiert wird ein System einerseits durch seine Fähigkeit, mit seiner Umwelt über die Systemgrenze hinweg Materie, Energie und Informationen

auszutauschen (offenes oder geschlossenes System), andererseits durch die Stärke der Ausprägung seiner Eigenschaften [Pah-97], [Lin-00], [Rop-99].

Auch die Fabrik kann als System aufgefasst werden. Sie tauscht mit ihrer Umwelt Materie, Energie und Informationen aus und verändert diese durch ihre Systemelemente. Die Möglichkeit, die Auflösung der Betrachtung je nach Bedarf anpassen zu können, kommt der Vorgehensweise bei der Fabrikplanung entgegen. Soll beispielsweise die Verknüpfung einer Fabrik mit den anderen Elementen eines globalen Produktionsnetzwerkes untersucht werden, so kann die Betrachtung auf der Ebene des Produktionssystems erfolgen. Soll die Optimierung eines einzelnen Produktionsbereichs erfolgen, wird sich eine genauere Betrachtung des Systems Produktionsbereich und seiner Komponenten (zum Beispiel Maschinen und Anlagen) als sinnvoller erweisen. So ergibt sich eine hierarchische Sicht auf das System Fabrik, wie sie in Abbildung 5-2 dargestellt ist.

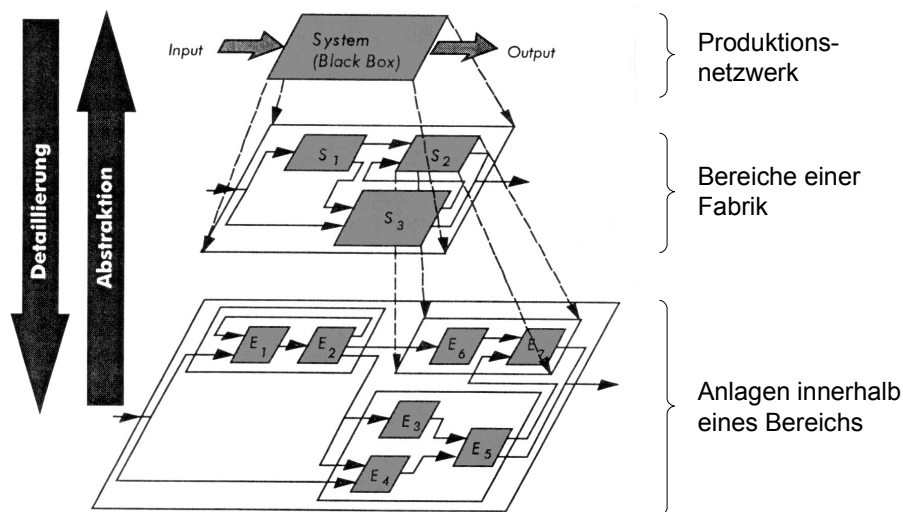


Abbildung 5-2: Die Fabrik als hierarchisches System betrachtet (nach [Wie-05])

Daneben sind auch funktionale und strukturelle Konzepte möglich [Rop-99].



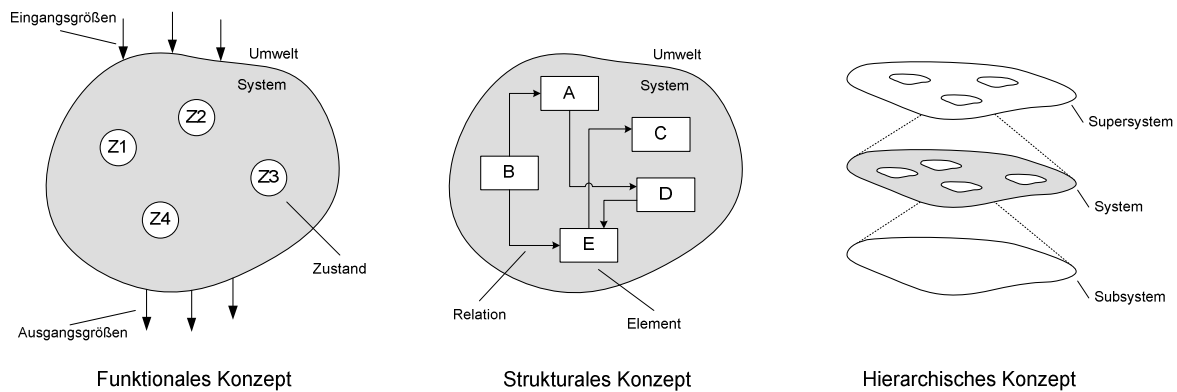


Abbildung 5-3: Systemkonzepte (nach [Rop-99])

Ein funktionales Konzept stellt eine Betrachtung des Untersuchungsgegenstandes als Black Box dar, die durch ihre von außen beobachtbaren Eigenschaften, das heißt die Reaktion der Ausgangs- auf die Eingangsgrößen, beschrieben wird. Bei der funktionalen Abbildung einer Fabrik liegt der Fokus der Betrachtung auf den Geschäftsprozessen und der zu erbringenden Marktleistung, um zu erklären, welche Funktionen und Zwecke von ihr erfüllt werden [Her-03]. Die Fabrik ist also ein System, das die Eingangsgrößen Energie, Material, Information und Kapital durch Prozesse in für den Absatz bestimmte Marktleistungen umsetzt. Weitere Ausgangsgrößen sind wiederum Material (neben dem eigentlichen Produkt auch unerwünschtes wie z. B. Abfälle), Energie, Informationen und Kapital [Rop-99].

Wird eine strukturelle Sicht auf das System Fabrik gewählt, richtet sich der Schwerpunkt der Betrachtung auf die Elemente des Systems und ihre Relationen. Dadurch wird eine Untersuchung der Anordnung der Komponenten und somit der Organisation des Systems ermöglicht. Die Fabrik als strukturelles System betrachtet hauptsächlich den Mensch, die Technik sowie Ablauf- und Aufbauorganisation.

Bei dieser Einteilung nach der Art der Systemkonzepte ist zu beachten, dass es sich keineswegs um exklusive Darstellungen, sondern um verschiedene Sichtweisen handelt, die stark miteinander in Verbindung stehen und gleichzeitig auf dasselbe System angewendet werden können.

Durch die Zielsetzung dieser Arbeit, eine Modularisierung von Materialflusssystemen zu erarbeiten, wird vorwiegend die funktionale Sicht zur Anwendung kommen. Zur Einordnung der einzelnen Materialflusssysteme in das Gesamtsystem Fabrik erweist

sich jedoch eine hierarchische Sicht als hilfreich, während eine funktionale Wahrnehmung dazu dient, die Elemente des Systems zu beschreiben, ohne sie weiter zu detaillieren. Die verschiedenen Systemkonzepte ergänzen sich und tragen zu einer vollständigen Erfassung des Untersuchungsgegenstandes bei.

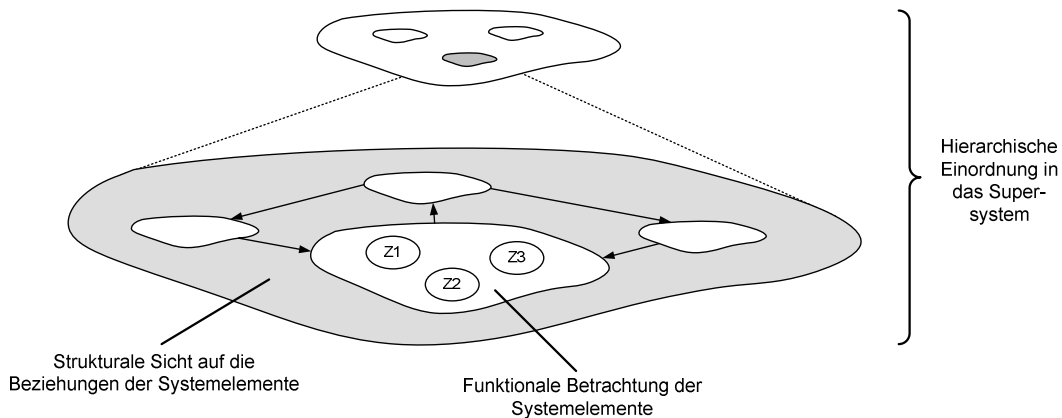


Abbildung 5-4: Zusammenspiel der Systemkonzepte (nach [Rop-99])

Abbildung 5-4 verdeutlicht das Zusammenwirken der Systemkonzepte. Zur Einordnung der Fabrik in das Produktionsnetzwerk kann beispielsweise eine hierarchische Sichtweise eingenommen werden. Die Anordnung einzelner Produktionsbereiche zeigt die strukturelle Sicht auf die Systemelemente, die wiederum funktional betrachtet werden können.

Systeme können, wie Abbildung 5-6 in dargestellt, prinzipiell durch Strukturkopplung und Transformation verändert werden. Strukturkopplung bedeutet, dass lediglich die Relationen zwischen den Systemkomponenten neu vernetzt werden. Durch die dabei veränderten Systemeigenschaften kann eine Anpassung an geänderte Randbedingungen erfolgen. Werden Systemelemente ausgetauscht oder neue hinzugefügt, handelt es sich um eine Transformation. Generell unterscheiden sich die beiden Veränderungstypen anhand des Veränderungsbedarfs, durch den sie induziert werden. Eine Strukturkopplung ermöglicht nur, im System bereits vorhandene Potenziale zu nutzen, während die Transformation eine beliebig weit gehende Systemveränderung erlaubt.

Wird ein Materialflusssystem als System betrachtet, lassen sich auch hier die grundlegenden Arten der Systemveränderung wieder finden. Eine Strukturkopplung findet zum Beispiel dann statt, wenn bei einer Änderung der Produktionsreihenfolge der Materialfluss ohne baulichen Eingriff angepasst wird. Zieht die Einführung eines neuen Produkts eine starke Erhöhung der Menge nach sich, muss unter Umständen das Materialflusssystem erweitert werden. In diesem Fall spricht man von einer Transformation des Systems.

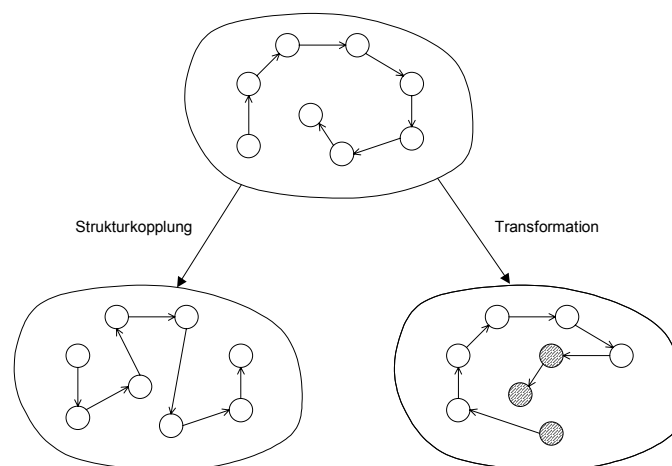


Abbildung 5-5: Arten von Systemveränderungen

## 5.2 Modulare Fabrikstrukturen

Im Bereich der Fabrikplanung und Produktionssysteme sind in den letzten Jahren einige Ansätze zur Modularisierung erarbeitet worden. Ziel dieses Kapitels „Modulare Fabrikstrukturen“ ist es, einen Überblick über die hauptsächlich aus der Fabrikplanung stammenden Ansätze zu geben und zu überprüfen, in wie weit diese Methodiken auf Materialflusssysteme übertragbar sind. Als Ergebnis wird eine Gestaltungsrichtlinie für die Modularisierung von Materialflusssystemen ausgewählt.

### 5.2.1 Allgemeine Moduldefinition

Die Methode der Modularisierung ist schon seit langer Zeit Bestandteil vieler wissenschaftlicher Betrachtungsweisen. In den folgenden Ausführungen soll ein Überblick über bestehende Definition und Ansätze der Modularisierung, ausgehend von allge-

meinen Definitionen bis hin zu Ansätzen aus dem Gebiet der Fabrikplanung gegeben werden.

In der Brockhaus-Enzyklopädie wird der Begriff „Modul“ folgendermaßen definiert: „Ein Stück Hardware (Gerät) oder Software (Programm), das als klar umgrenzte Bau- oder Funktionsgruppe einen Teil eines Ganzen bildet und geändert oder ausgetauscht werden kann, ohne dass Veränderungen im übrigen System erforderlich werden. Für das Zusammenfügen von Modulen zu einem arbeits- oder lauffähigen System müssen Schnittstellen festgelegt bzw. beachtet werden. Der Aufbau von Systemen aus Modulen bietet den Vorteil der einfachen Anpassung an mehrere unterschiedliche Aufgaben“ [Bro-86].

Nach dem Langenscheidt Fremdwörterbuch wird unter einem Modul eine Bauteilgruppe verstanden, die eine funktionale Einheit bildet und als solche komplett austauschbar ist, bzw. mehrere Einzelkomponenten, die in einem System eine funktionale Einheit bilden [Lan-05].

Nach Hansen sind Module Beschreibungen von Bausteinen technischer Systeme, die unterschiedliche Abstraktionsgrade aufweisen können. Bausteine können z.B. Formelemente, Einzelteile, Baugruppen, Funktions- und Montageeinheiten sowie Maschinen bzw. –gruppen umfassen, weisen also unterschiedliche Komplexität aus [Han-74]. Eversheim unterscheidet eine Abgrenzung eines Moduls nach physischen (räumliche Anordnung) oder nach funktionalen Aspekten (funktionale Zusammenhänge) [Eve-96]. Ergänzt wird die Begriffsdefinition durch Schuh, dass der Vormontageumfang von Modulen mit standardisierten Schnittstellen wesentlich höher ist als der Einbauaufwand in das übergeordnete System und die Module vorab weitgehend überprüfbar sind [Sch-89]. Bei Einhaltung der Schnittstellenspezifikation können die Module unabhängig voneinander entwickelt und getestet werden [vHi-90].

Diese genannten Definitionen entsprechen dem Ansatz von Baldwin, wonach die Module kleine, unabhängig voneinander entwickelte Teilsysteme sind, die zu einem funktionierenden integrierten System (Produkt) zusammengefügt werden können [Bal-98].

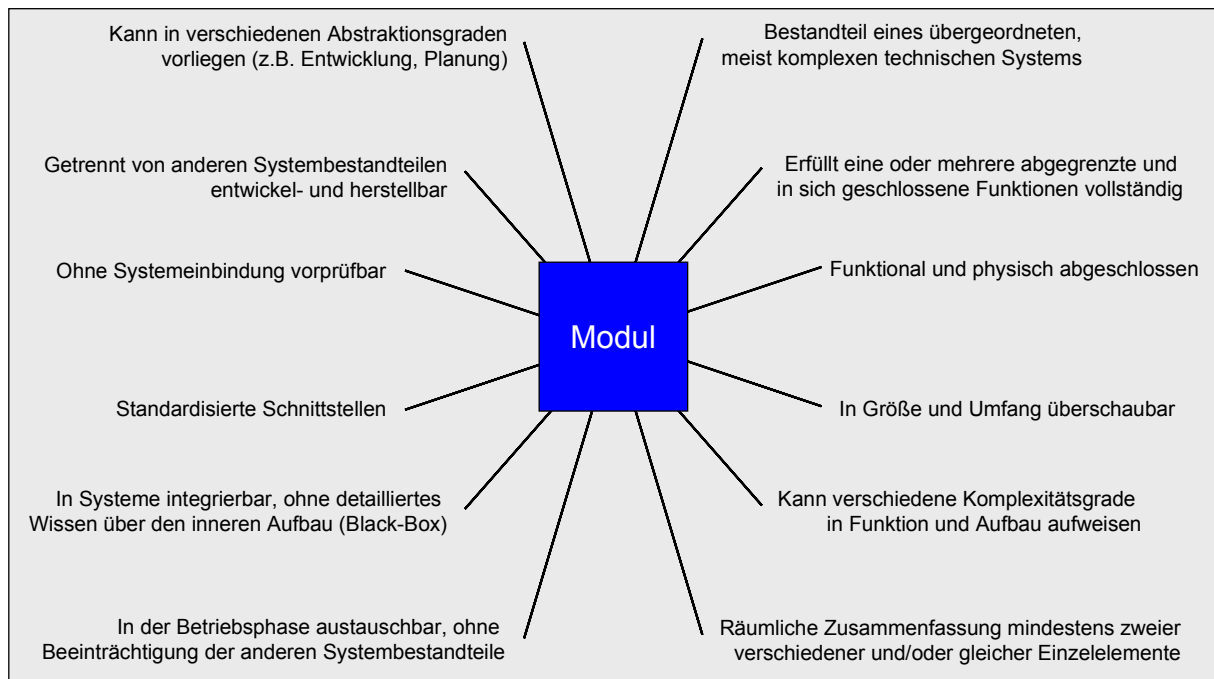


Abbildung 5-6: Allgemeine Eigenschaften und Beschreibungsmerkmale eines Moduls [Hil-05]

In Abbildung 5-6 sind alle recherchierten Eigenschaften und Beschreibungsmerkmale von Modulen dargestellt. Zusammenfassend kann für die Beschreibung eines Moduls der von Göpfert entwickelte Modulbegriff gewählt werden. Ein Modul ist ein spezielles Subsystem, dessen interne Beziehung sehr viele stärker ausgeprägt sind als die Beziehungen zu anderen Subsystemen und das von Veränderungen auf höheren und niedrigeren Systemebenen weitgehend unabhängig ist [Göp-98].

Ausgehend von einer allgemeinen Moduldefinition und –beschreibung soll nun anhand von bestehenden, wissenschaftlichen Modularisierungsansätzen in der Fabrikplanung die Übertragbarkeit und Eignung für die Modularisierung von Materialflusssystemen überprüft werden.

### 5.2.2 Ansätze zur Modularisierung von Fabrikstrukturen

In dem durchgeführten EU-Verbundforschungsprojekt „Modular Plant Architecture“ wurde in Zusammenarbeit von Forschungsinstituten und einem Industriekonsortium eine Methodik zur Gestaltung modularer, wandlungsfähiger Produktionssysteme

entwickelt [Sch-04a]. Die Modularisierung verfolgt die Zielsetzung, Veränderungseinflüsse (in diesem Fall auch Change Driver genannt) auf bestimmte Elemente des Produktionssystems zu konzentrieren und dabei einen am wirtschaftlichen Gesamtnutzen orientierten Modularitätsgrad zu erzeugen. Die Elemente eines Produktionssystems sind z.B. so zu gestalten, dass eine Untergliederung entsteht, in der die Change Driver einen möglichst begrenzten Einfluss auf die Produktionsstruktur haben [Sch-03a], [Sch-03b], [Eve-01]. Als Modularisierungsprinzipien wurden hier die Trennung der instabilen, sich im Zeitverlauf wandelnden, von den dauerhaft stabilen Elementen des Produktionssystems und die Kapselung der im Zeitverlauf veränderlichen Elemente in Modulen sowie die Kapselung der stabilen Bestandteile in Plattformen angewandt. Die Modularisierung erfolgt dabei im Kontext von Fabriken und Produktionssystemen auf verschiedenen Strukturierungsebenen (z.B. Arbeitsstation, Linie, Segment, Fabrik).

Als Vorteile dieses Modularisierungsansatzes wurden folgende Eigenschaften genannt [Sch-04a]:

- Begrenzung des Änderungsaufwandes auf einzelne Module bei Anpassung an unterschiedliche Anforderungen
- Schrittweise Skalierbarkeit der Produktionskapazität bei Änderung des Produktionsvolumen durch Hinzufügen/Wegnahme von Modulen
- Anpassung des Systems an veränderte Produktionstechnologien und Automatisierungsgrade über den Lebenszyklus durch den Austausch einzelner Module
- Wieder- und Weiterverwertbarkeit von Modulen
- Komplexitätsreduzierung während der Planungsphase durch Betrachtung der Module als Black-Boxes

Diese genannten Vorteile des Modularisierungsansatzes von Produktionssystemen sind sehr allgemein gefasst und können auf alle Arten von modularen Strukturen übertragen werden.

Im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Wandlungsfähigkeit durch modulare Fabrikstrukturen“ wurde eine Methode zur Gestaltung wandlungsfähiger Fabriken auf Basis modularer Strukturen entwickelt [Wie-03b], [Wie-05].

Bei der Umsetzung und Gestaltung wandlungsfähiger Strukturen müssen neben technischen auch organisatorische und räumliche Aspekte mit berücksichtigt werden. Demzufolge werden bei der Definition und Gestaltung von Fabrikmodulen technische, organisatorische und räumliche Fabrikelemente gemeinsam betrachtet (vgl. Tabelle 5-1).

<b>Gestaltungsbereiche</b>			
	Betriebsmittel (B)	Organisation (O)	Raum- und Gebäude-technik (R)
<b>Fabrikelemente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fertigungseinrichtungen</li> <li>• Montageeinrichtungen</li> <li>• Logistikeinrichtungen</li> <li>• Informationssysteme</li> <li>• Qualitätssicherungseinrichtungen</li> <li>• Übergeordnete Steuerungseinrichtungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unternehmensstrategie</li> <li>• Logistikkonzept</li> <li>• Prozessgestaltung</li> <li>• Aufbauorganisation</li> <li>• Arbeitsorganisation</li> <li>• Qualitätssicherungskonzept</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fläche</li> <li>• Bauwerk</li> <li>• Ausstattung</li> <li>• technische Anlagen</li> <li>• Außenanlagen</li> </ul>

Tabelle 5-1: Gestaltungsbereiche mit den entsprechenden Fabrikelementen einer modulare Fabrikstruktur (nach [Wie-03b])

Ein Fabrikmodul, das sich aus den in Tabelle 5-1 aufgeführten Fabrikelementen zusammensetzen lässt, wird folgendermaßen definiert. Ein Fabrikmodul

- ist ein räumlich abgegrenzter Bereich der Fabrik,
- hat eine Aufgabe zu erfüllen und diese in Form einer Leistung zur Verfügung zu stellen,
- wird eindeutig einer Fabrikstrukturebene zugeordnet,
- kann Submodule enthalten,
- kann Fabrikelemente der drei Gestaltungsebenen enthalten und

## 5 Modularisierungsmethodik

- wird über definierte Schnittstellen mit allen für die Erfüllung der Aufgabe notwendigen Flüssen (Material, Medien, Informationen usw.) ausreichend versorgt.

Aus den Elementen der drei Gestaltungsbereiche lassen sich Module bilden, die fünf Strukturebenen zugeordnet sind. In Abbildung 5-7 ist die hierarchische Strukturierung einer Fabrik in die Ebenen Einzelplatz, Gruppe, Bereich, Generalstruktur und Standort dargestellt.

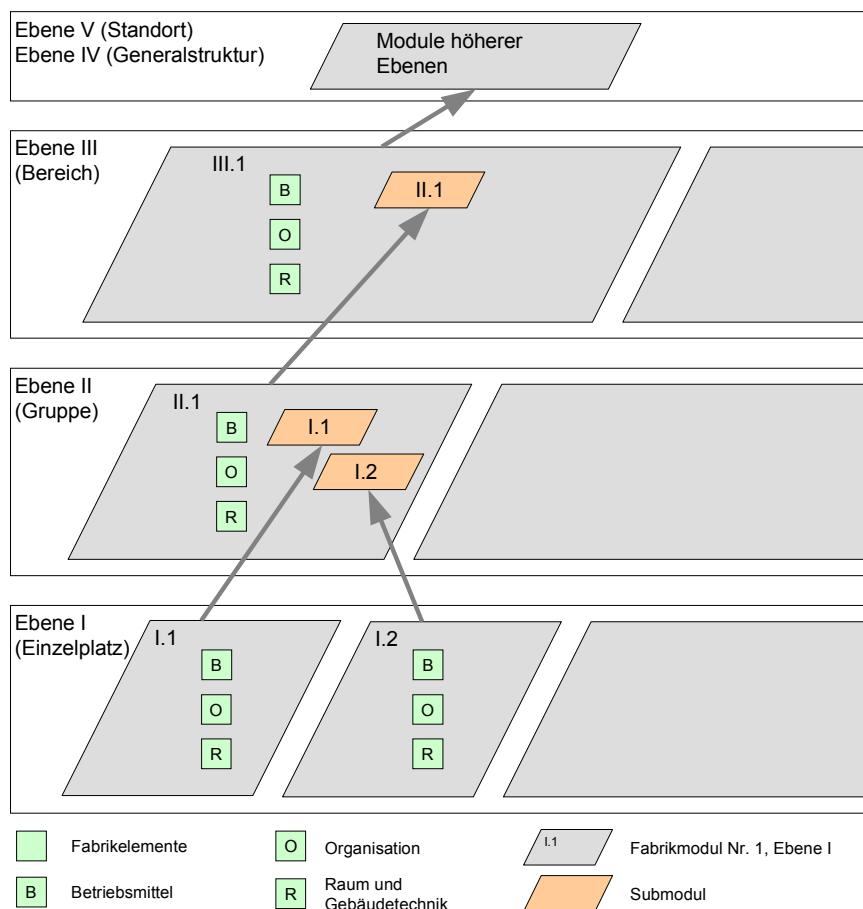


Abbildung 5-7: Hierarchie-Ebenenmodell einer modularen Fabrik (nach [Wie-05])

Die Bestandteile der Module aller weiteren Ebenen können sowohl eigene Funktionselemente als auch Module niedriger Ebenen, also Submodule, sein. Diese Submodule werden generell durch zusätzliche Elemente technisch, räumlich und organisatorisch verknüpft. Werden beispielsweise mehrere Einzelarbeitsplätze zu einer Gruppe zusammengefasst, können Fabrikelemente notwendig werden.



Um das Wandlungspotenzial modular aufgebauter Fabriken effizient nutzen zu können, ist es notwendig, die in diesen Fabriken möglichen Veränderungsprozesse detailliert zu beschreiben. Aus diesem Grund wurden drei Typen von Veränderungen unterschieden.

Die Elementveränderung innerhalb eines Moduls ist der Veränderungstyp mit der geringsten Wirkungstiefe. Die Struktur des Moduls bleibt dabei erhalten, es werden nur die Ausprägungen der einzelnen Fabrikelemente angepasst. Derartige Änderungen werden meist während des Fabrikbetriebs durchgeführt.

Die Modulveränderung geht über das Anpassen von Elementausprägungen hinaus, beeinflusst aber nicht die Beziehungsstruktur zwischen mehreren Modulen. Innerhalb eines Moduls können Fabrikelemente entfernt, hinzugefügt oder ausgetauscht werden. Submodule werden nicht verändert. Die Komplexität und der Umfang der Veränderung gehen über das hinaus, was die Mitarbeiter des betroffenen Moduls selbst planen und umsetzen können. Modulexterne Mitarbeiter werden einbezogen, um die tatsächliche Veränderung durchzuführen. Andere Module sind von der betroffenen Modulveränderung nicht berührt. Eine Modulveränderung kann zum Beispiel das Ersetzen von eingesetzten Flurförderzeugen durch Transportbänder sein, die lediglich der Kopplung von modulinternen Arbeitsplätzen (Submodule) dienen.

Eine Strukturveränderung liegt vor, wenn der Wandel den Umfang einer Modulveränderung übersteigt und Module verschiedener Ebenen betroffen sind. Zuordnungen innerhalb des Moduls ändern sich, Submodule können entfernt, hinzugefügt, ersetzt oder umgestaltet werden. Die Veränderung muss dabei im Rahmen des vorhandenen Wandlungspotenzials erreicht werden können.

Hernandez beschäftigt sich mit der Identifikation und Entwicklung von Wandlungsbausteinen, die einer Fabrik ein gewisses Wandlungspotenzial verschaffen [Her-03]. Wandlungsfähigkeit ist ein Maß dafür, wie gut ein System an beliebige, insbesondere auch ungeplante, veränderte Bedingungen angepasst werden kann. Dabei werden nicht nur die Relationen zwischen den Systemelementen verändert, sondern zusätzlich neue Komponenten eingefügt und andere entfernt. Da das System Fabrik für eine direkte Bewertung deutlich zu komplex ist, bietet es sich an, bei der Betrachtung nach Hierarchieebenen des Systems Fabrik zu differenzieren. Für jede dieser Ebenen lassen sich nun Systemkomponenten identifizieren, an denen

Wandlungsprozesse durchgeführt werden können. Diese Elemente werden als Wandlungsobjekte bezeichnet. Ein Beispiel für ein Wandlungsobjekt auf der Systemebene „Produktions- und Logistikbereich“ stellt das Produktionslayout dar. Dieses kann weiter in die Wandlungsobjekte Hauptproduktionsfluss, räumliche Funktionsanordnung, Produktionsflächen und Verkehrsnetz unterteilt werden [Her-03].

Im Wandlungsprozess spielen die Wandlungsobjekte eine passive Rolle. Per se ist keine Aussage über die Wandlungsfähigkeit eines Objekts möglich, diese wird ihm erst durch dem Objekt innewohnende Eigenschaften, so genannte Wandlungsbefähiger, eingeprägt. Diese Wandlungsbefähiger können den in Tabelle 5-2 dargestellten sechs Gruppen zugeordnet werden.

<b>Wandlungsbefähiger</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Mobilität</li><li>• Modularität</li><li>• Erweiter- und Reduzierbarkeit</li><li>• Funktions- und Nutzungsneutralität</li><li>• Desintegrations- und Integrationsfähigkeit</li><li>• Vernetzungsfähigkeit</li></ul>

Tabelle 5-2: Wandlungsbefähiger (nach [Her-03])

Aus der Kombination eines Wandlungsobjekts mit einem -befähiger entstehen Wandlungsbausteine, die als grundlegende Elemente der Wandlungsfähigkeit angesehen werden können. Wie in Abbildung 5-8 am Beispiel des Wandlungsobjekts Produktionslayout dargestellt, entsteht aus dem Objekt durch die zum Wandel befähigenden Eigenschaften Modularität, Vernetzungsfähigkeit sowie Desintegrations- und Integrationsfähigkeit ein wandlungsfähiges Systemelement, ein Wandlungsbaustein.



änderungen und auf neue Anforderungen reagieren zu können. Genau diese zwei Aspekte sollen bei der weiteren Vorgehensweise zur Entwicklung von modularen Materialflusssystemen als Grundlage herangezogen werden.

## 5.3 Funktionsorientierte Modularisierung

Für die Entwicklung einer Methode zur Gestaltung modularer Materialflusssysteme gilt es in einem ersten Schritt die Art der angewandten Modularisierungsstrategie auszuwählen. Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wird ein Modul in den meisten Fällen immer nach der jeweilig zu Grunde liegenden Funktion beschrieben. Aus diesem Grund soll bei der Gestaltung von modularen Materialflusssystemen die Methode einer funktionsorientierten Modularisierung eingehender untersucht und angewandt werden.

### 5.3.1 Allgemeiner Ansatz

Die Modularität einer Fabrikstruktur lässt sich anhand der gegenseitigen Beeinflussung der funktionalen und der physischen Beziehungen zwischen einzelnen Strukturelementen, die in einer zeitlichen und räumlichen Struktur zusammengefasst sind, beschreiben (vgl. Abbildung 5-9) [Göp-98]. Je höher die relative Unabhängigkeit beider Dimensionen in einem System ist, um größer und effektiver ist dessen Modularität. Das Spektrum von modularen Strukturen enthält neben den beiden Extremen modulare und nicht-modulare Struktur eine physisch und eine funktional-modulare Struktur.

Funktional-modulare Strukturen sind eine Mischform, die funktional unabhängige Strukturelemente aufweisen. Somit sind die Funktionen den einzelnen Elementen zuzuordnen. Die Schnittstellen sind aber so gestaltet, dass die Komponenten nur schwer trennbar sind. Bei den physisch-modularen Strukturen liegt eine Mischform vor, die zwar physisch unabhängige Strukturelemente aufweisen, aber ihre Funktion nur durch eine Kombination der einzelnen Elemente erfüllt wird.

Modulare Strukturen sind dadurch gekennzeichnet, dass die ihnen zu Grunde liegenden Elemente sowohl funktional als auch physisch relativ unabhängige Einheiten bilden. Diese sind zumeist nicht an spezielle Platzhalter in einer Fabrikstruktur gebunden, sondern können prinzipiell an verschiedenen oder beliebigen Orten eingesetzt werden. Nicht-modulare Strukturen stellen genau das Gegenstück zu den modularen Strukturen dar und werden auch als integrale Strukturen bezeichnet.

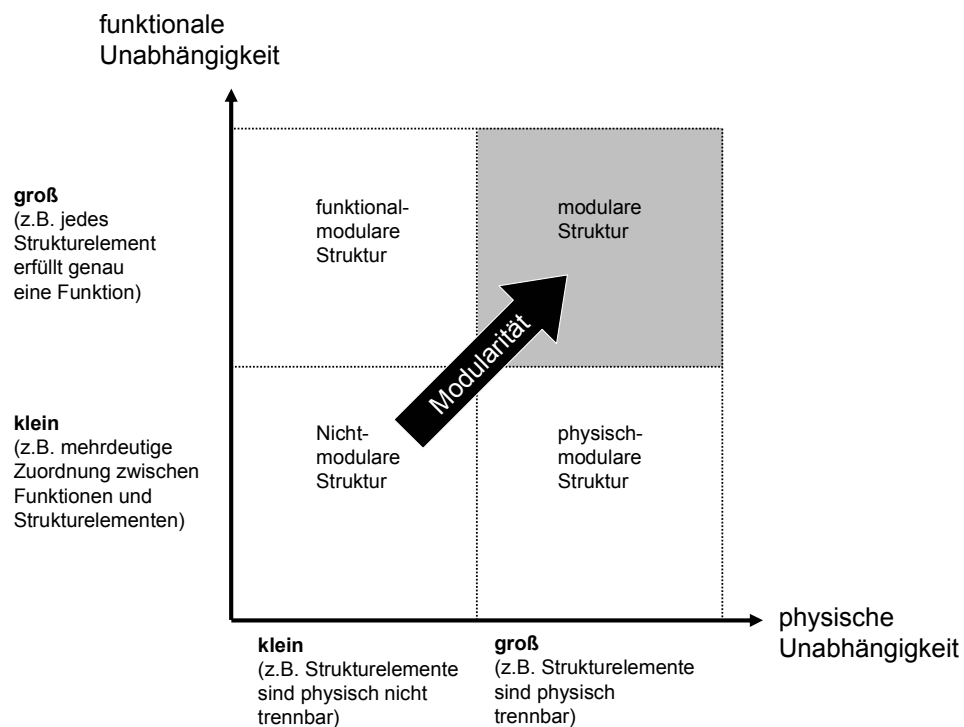


Abbildung 5-9: Zusammenhang zwischen Modularität sowie physischer und funktionaler Abhängigkeit

Eine Vorreiterrolle auf dem Gebiet der funktionsorientierten Modularisierung stellen dabei die Methoden aus dem Bereich des Software Engineering und der Produktentwicklung dar [Koh-97]. Bei der Gestaltung der Modularität wird zwischen fünf Kriterien unterschieden: Zerlegbarkeit, Kombinierbarkeit, Verständlichkeit, Stetigkeit und Geschütztheit [Mey-97]. Diese Gestaltungsregeln werden ergänzt um die Forderung nach identischen Systemgrenzen sowohl auf der mechanischen, energetischen und steuerungstechnischen Ebene [Wil-06]. Zum anderen müssen die Systemgrenzen nach deren Funktionalität gezogen werden. In Tabelle 5-3 sind die Kriterien für eine funktionsorientierte Modularisierung zusammengefasst.

Kriterium	Erklärung
Zerlegbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein Materialflusssystem kann in Subsysteme und diese wiederum in Module zerlegt werden</li> </ul>
Kombinierbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Module lassen sich frei und unabhängig voneinander zu neuen Systemen kombinieren</li> </ul>
Verständlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Funktion eines Moduls muss für den Anwender (Bediener/Planer) verständlich sein</li> <li>• Die Verwendung eines Moduls erfordert keine Kenntnisse über seinen inneren Aufbau (Black-Box-Prinzip)</li> </ul>
Stetigkeit und Geschütztheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Änderungen im Inneren eines Moduls, die seine Schnittstellen unverändert lassen, dürfen keine Rückwirkungen auf das übrige System haben</li> <li>• Fehler und Störungen in einem Modul sollten auf das Modul bzw. höchstens auf die Nachbarmodule Auswirkungen haben</li> </ul>
Identität der Systemgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Systemgrenzen von Mechanik, Energie und Steuerungstechnik eines Moduls müssen identisch sein</li> </ul>
Funktionsorientierte Betrachtung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modulgrenzen werden entsprechend der Funktionalität gezogen</li> <li>• Das Modul kann seine Funktion ohne Einbettung in das Gesamtsystem erfüllen.</li> <li>• Es lässt sich unabhängig von anderen Module testen und in Betrieb nehmen</li> </ul>

Tabelle 5-3: Kriterien für eine funktionsorientierte Modularisierung

Für die weitere Betrachtung wird bei modularen Materialflusssystemen der Ansatz der vollkommen modularen Struktur gewählt, bei dem physisch und funktional unabhängige Einheiten vorliegen und über dieselbe Schnittstelle verfügen.

### 5.3.2 Hierarchieebenenmodell

Da sich die Fabrik in seiner Struktur und den einzelnen, verschiedenartigen Prozessen als ein sehr komplexes System erweist, gilt es in einem ersten Schritt die Komplexität dieser Struktur zu reduzieren. Dabei bietet sich eine hierarchische Strukturierung an, die in vielen Modularisierungsansätzen (vgl. Kapitel 5.2.2) angewandt wird. Alle in einem Fabrikssystem auftretenden Prozesse, bei denen der Materialfluss eine Rolle spielt, werden so in hierarchischer Form strukturiert. Abbildung 5-10 zeigt eine mögliche Strukturierung der in einem System auftretenden Prozesse. Diese Vorgehensweise erfolgt in starker Anlehnung an die allgemeine Systemtheorie (vgl. Kapitel Allgemeine Systemtheorie), die ebenfalls u.a. einen hierarchischen Aufbau eines Systems darstellt.

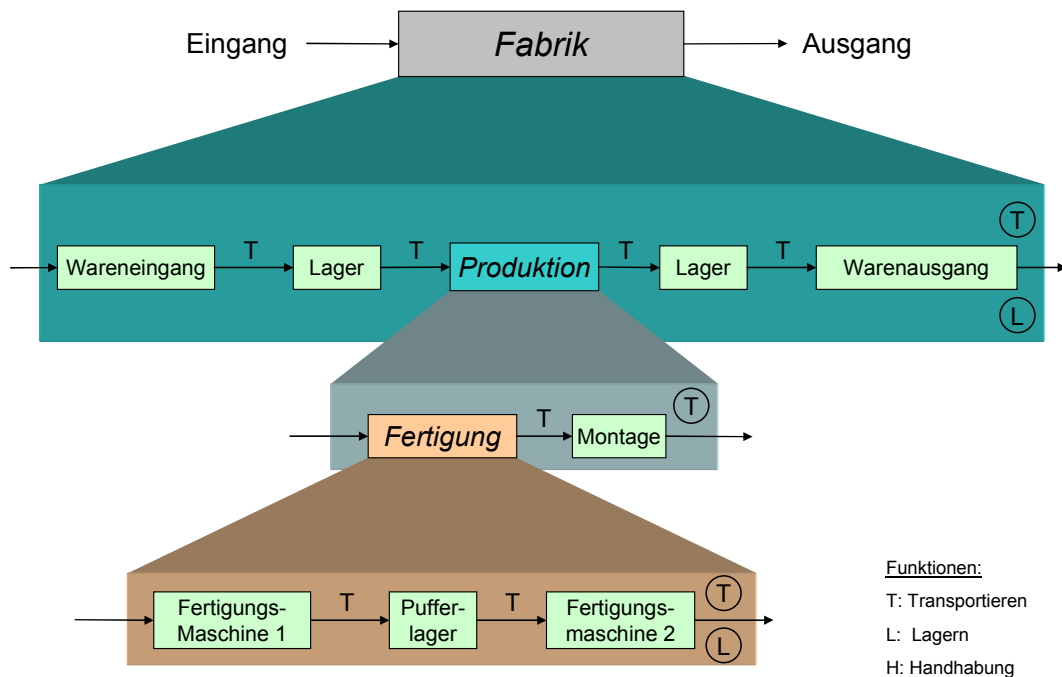


Abbildung 5-10: Einordnung der Funktionen im Hierarchieebenenmodell eines Materialflusssystemes

Die Anzahl der Hierarchiestufen ist nicht festgelegt und kann je nach Anwendungsfall oder betrachtetem Szenario variieren. Für jeden der festgelegten Prozesse werden die dabei benötigten Funktionen eines Materialflusses festgelegt werden. Das Materialflusssystem kann dabei sowohl einzelne Arbeitsstationen innerhalb eines Prozes-



ses miteinander verknüpfen als auch untergeordnete Prozesse und Bereiche miteinander zu einem Prozess auf höherer Ebene verbinden.

Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, stehen für die Durchführung von Materialflussoperationen die Funktionen Transportieren, Lagern und Handhaben zur Verfügung. Ausgehend von den globalen Kennwerten und Zielen einer Fabrik werden für die einzelnen Bereiche und Prozesse die lokalen Kennwerte bestimmt, auf dessen Basis für die einzelnen Funktionen geeignete, für diesen Anwendungsfall zutreffende, materialflusstechnische Komponenten ausgewählt werden. Für jeden Prozess können somit ganz speziell auf diesen Bereich zugeschnittene Anforderungen definiert werden.

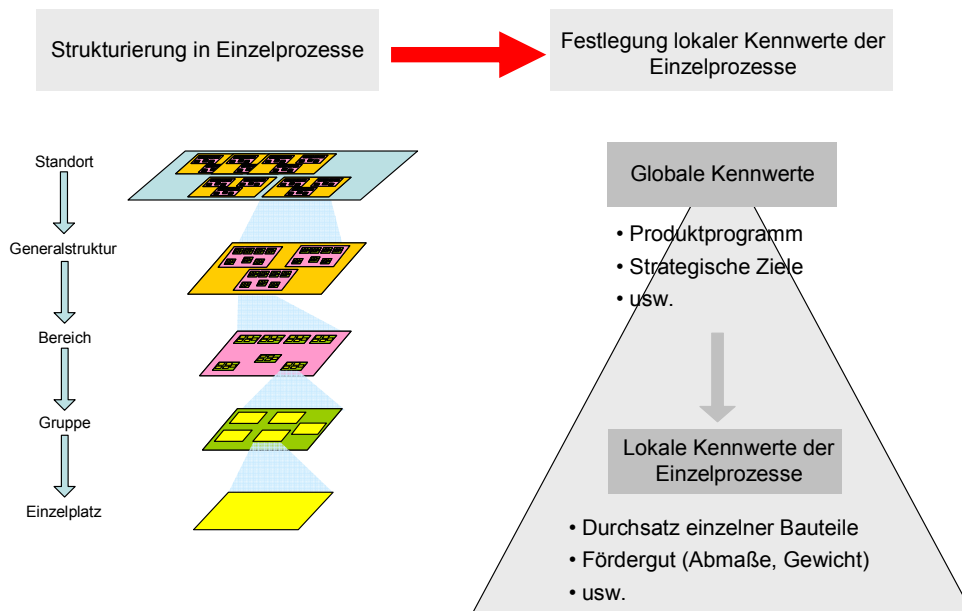


Abbildung 5-11: Vorgehensweise bei der Bildung von lokalen Kennwerten

In Abbildung 5-11 ist die Vorgehensweise bei der Erarbeitung von lokalen Kennwerten dargestellt. Mit zunehmender Detaillierungstiefe bei der hierarchischen Strukturierung der Prozesse und Bereiche nimmt der Informationsumfang bei den lokalen Kennwerten zu.

Folgender Auflistung (Tabelle 5-4) zeigt die für die weitere Auswahl der materialflusstechnischen Komponenten notwendigen lokalen Kennwerte. Der Fokus dieser Kennwerte liegt auf der Betrachtung der Materialflussfunktion „Transportieren“.

Bezeichnung	Wert
<b>Physische Daten</b>	
Daten Fördergut:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abmessung</li> <li>• Gewicht</li> <li>• Handhabungseinrichtungen</li> <li>• Spezifische Eigenschaften (z.B. Stoßempfindlichkeit, Gefahrenhinweise usw.)</li> </ul>	 [mm] [kg]
Daten Ladungsträger (falls festgelegt):	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Typ</li> <li>• Abmessung</li> <li>• Gewicht</li> <li>• Füllungsgrad</li> </ul>	 [mm] [kg]
<b>Leistungsdaten</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchsatz/Leistung</li> <li>• Losgröße</li> <li>• Verfügbarkeit</li> </ul>	[TE/h]
<b>Flexibilitätsanforderungen</b>	
Layoutflexibilität	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flächenmäßige Flexibilität</li> <li>• Höhenmäßige Flexibilität</li> </ul>	 [1 – 5] <sup>(1)</sup> [1 – 2] <sup>(2)</sup>
Durchsatzflexibilität	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchsatzreserve</li> <li>• Richtungsflexibilität</li> </ul>	 [LE/h] [1 – 2] <sup>(3)</sup>
Fördergutflexibilität	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilität des Greifbildes</li> </ul>	(4)

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwendung von Standardladehilfsmittel</li> </ul>	(5)
<b>Rahmenbedingungen</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bautechnischer Art (Gebäude, Bodentraglast, Deckentraglast,...)</li> <li>• Medientechnik (z.B. Energetische Versorgung)</li> <li>• Betriebswirtschaftliche Daten (z.B. Investitionskosten, Budget, Amortisationszeit, Verfügbares Personal)</li> <li>• Allgemeine Auflagen (z.B. Gesetzliche Bestimmungen, Umweltrechtliche Auflagen)</li> </ul>	
<p><b>Legende:</b></p> <p>(1): Kriterien gemäß Abbildung 4-13  (2): Kriterien gemäß Abbildung 4-14  (3): Kriterien gemäß Abbildung 4-15  (4): Kriterien gemäß Abbildung 4-17  (5): Kriterien gemäß Abbildung 4-16</p>	

Tabelle 5-4: Übersicht über wichtige lokale Kennwerte in Bezug auf die Funktion „Transportieren“

Neben den reinen physischen Daten und den Leistungsanforderungen an die Transportaufgabe, die bei einer Planung auch jetzt schon Berücksichtigung finden (vgl. Kapitel 3.1.3), werden durch die lokalen Kennwerte zusätzlich die Anforderungen an die Flexibilität mit berücksichtigt. Diese setzen sich, wie in Kapitel 4.3 dargestellt, aus den einzelnen Bestandteilen Layout-, Fördergut- und Durchsatzflexibilität zusammen. Somit ist es möglich, für jeden Prozess oder Bereich spezielle Flexibilitätsanforderungen zu definieren und somit gezielt geeignete materialflusstechnische Komponenten auszuwählen. Diese genaue Unterscheidung der Flexibilitätsanforderungen an die einzelnen Bereiche und auf Prozessebene ist sinnvoll, da diese in vielen Fällen erheblich variieren. Ist es z.B. in einem Bereich erforderlich, den ganzen Raum komplett bedienen zu können, wobei der Durchsatz eine untergeordnete Rolle spielt, kann bei der Verknüpfung von einzelnen Bereichen die Layoutflexibilität eine geringe Rolle spielen. Dafür wird aber ein hoher Durchsatz verlangt.

Auf Basis der Definition der in den einzelnen Bereichen und Prozessen benötigten Funktionen und die Bestimmung der lokalen Kennwerte für diese Funktionen kann in einem nächsten Schritt die Auswahl der geeigneten Materialflusstechnik, die aus einzelnen Komponenten aufgebaut wird, durchgeführt werden.

### **5.3.3 Methodik der Modularisierung**

#### **5.3.3.1 Subsystem**

Ausgehend von dem beschriebenen Ebenenhierarchiemodell werden die benötigten Materialflussfunktionen für die einzelnen Bereiche bzw. Prozesse festgelegt und die entsprechenden lokalen Kennwerte mit dem entsprechenden Mindestpotenzial an Flexibilität dafür ermittelt. Für die einzelnen Materialflussfunktionen werden in einer nächsten Stufe geeignete Subsysteme ausgewählt, die die Anforderungen an die gestellte Materialflussfunktion erfüllen.

In Abbildung 5-12 ist die Vorgehensweise bei der Modularisierung und die durchgängige, funktionsorientierte Betrachtungsweise graphisch dargestellt. Ausgehend von den benötigten Funktionen in einem Bereich oder einen Prozess werden auf Basis der lokalen Kennwerte geeignete Subsysteme ausgewählt. Der Konkretisierungsgrad nimmt dabei mit zunehmender Modularisierungsstufe zu und die Teilfunktion wird genauer spezifiziert. Im Gegenzug nimmt der Abstraktionsgrad der zu erfüllenden Funktion stetig ab.

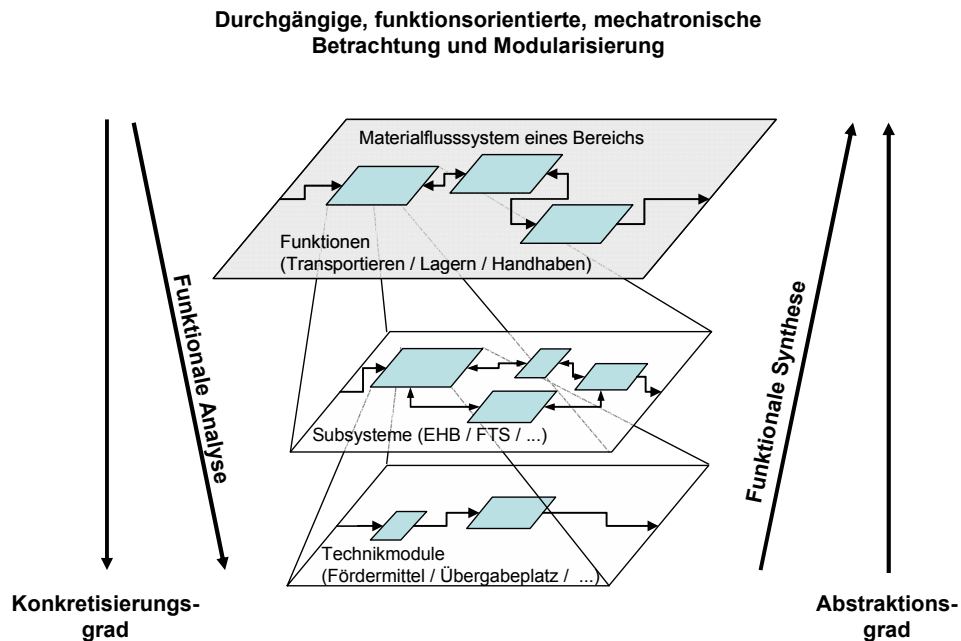


Abbildung 5-12: Funktionsorientierte Modularisierung eines Materialflusssystems

Diese Aufteilung auf mehrere Subsysteme hat den Vorteil, dass die an den Bereich gestellten Anforderungen nicht durch ein einziges System, sondern, falls erforderlich und wirtschaftlich sinnvoll, durch ein Zusammenspiel aus mehreren Subsystemen erfüllt werden. Diese Strukturierung in Subsysteme spielt vor allem bei dem Wandelbarkeitskriterium „Integrationsfähigkeit“ eine entscheidende Rolle, da gezielt gemäß dem neu geforderten Flexibilitätspotenzial ein weiteres, systemfremdes Subsystem hinzugefügt werden kann (vgl. Kapitel 4.2.2). Eine Vorauswahl der zur Erfüllung der Materialflussfunktion geeigneten Subsysteme erfolgt anhand der gestellten Flexibilitätsanforderungen. Die Charakteristik und die Eigenschaften von Subsystemen ist in Tabelle 5-5 dargestellt.

Subsystem
<ul style="list-style-type: none"><li>• Erfüllung einer der drei Materialflussfunktionen Transportieren, Lagern oder Handhaben</li><li>• Bestandteil eines Materialflusssystemes zur Erfüllung einer Materialflussfunktion</li><li>• Besteht aus einzelnen Technikmodulen</li><li>• Anzahl und Kombination der Technikmodule bestimmt das Potenzial des Subsystems</li><li>• Leistungsumfang variabel</li><li>• Beschreibung mit Absolutkoordinaten</li><li>• Landes- und standortspezifische Eigenschaften</li><li>• Vorauswahl der Subsysteme anhand der Flexibilitätskriterien möglich</li></ul>

Tabelle 5-5: Charakteristik und Eigenschaften eines Subsystems

Am Beispiel des Flexibilitätskriteriums „Fördergutflexibel“ soll die Möglichkeit bei der Vorauswahl eines Subsystems verdeutlicht werden. Wird für einen Bereich die Anforderung gestellt, dass die Bedienung der Maschinen bzw. die Anbindung über Übergabepplätze in der Fläche variabel ist, so scheiden bei diesem Kriterium eine Vielzahl an möglichen Transportsystemen (z.B. Rollenförderer, Regalbediengerät) aus. In diesem Fall könnte die Materialflussfunktion „Transportieren“ nur durch einen Brückenkran oder einen Flächenportalroboter durchgeführt werden.

Nach der Auswahl von geeigneten Subsystemen werden diese auf Basis der lokalen Kennwerte aus einzelnen Technikmodulen zusammengebaut (vgl. Abbildung 5-12). Idee ist dabei, dass dem Planer von Materialflusssystemen ein Baukasten zur Verfügung steht, der es ihm erlaubt, das Subsystem gezielt den Anforderungen entsprechend aufzubauen. Im folgenden Kapitel sollen diese Technikmodule definiert und eine Methode zur Modularisierung erarbeitet werden.

### 5.3.3.2 Struktur der Technikmodule

In seiner Dissertation zur Entwicklung einer verteilten und adaptiven Materialflusssteuerung definierte und entwickelte Lorentz Materialflussmodule für den Stückgut-

transport [Lor-03]. Bei dem angewandten Modularisierungsansatz wurden dabei folgende Prämissen berücksichtigt:

- Ein Materialflusssystem (MFS) besteht nur aus einzelnen Materialflussmodulen (MFM). Das MFS erfüllt seine Aufgabe durch das Zusammenspiel der einzelnen MFM. Es gibt kein einzelnes, das Gesamtsystem steuerndes MFM.
- Jedes MFM entspricht genau einer Förderstrecke, wobei unerheblich ist, ob es sich bei der Förderstrecke um eine einfache Strecke, eine Weiche, eine Zusammenführung oder ähnliches handelt.
- Jedes MFM hat genau eine, von den anderen Steuerungen unabhängige Steuerung, wobei deren Steuerungsprogramme jeweils der entsprechenden Fördertechnik innerhalb des MFM direkt zugeordnet sind. Die steuernden Programme sind statisch und fertig implementiert, Adaptivität wird ausschließlich durch Parametrisierung erzeugt.
- Jedes MFM ist in der Lage, mit anderen MFM zu kommunizieren. Es gibt in dem System kein bevorzugtes Modul, das den Informationsfluss mit den anderen MFM regelt. Bezüglich der Steuerungen der einzelnen MFM erfolgt eine globale Uhren-Synchronisation.
- Jedes MFM wird bei der Inbetriebnahme mit grundlegenden Daten ausschließlich in Bezug auf seine Vorgänger und Nachfolger MFM initialisiert.

Die genannten Prämissen zur Modularisierung sind nur für die spezielle Betrachtung von Stückguttransporten mittels Rollenförderer geeignet. In diesem Fall bilden die einzelnen Bestandteile eines Transportsystems, Transportmittels und Transportprozesses eine gemeinsame Einheit und sind somit einzeln nicht austauschbar. Alle drei Bestandteile verfügen über dieselbe Schnittstelle, so dass das Transportsystem nur als Ganzes betrachtet werden kann.

Bei vielen Transportsystemen bietet sich aber ein weitaus größerer Handlungsspielraum und die einzelnen Bestandteile sind einzeln austauschbar. Jeder der drei Bestandteile erfüllt eine eigene Funktion und verfügt über eigene Schnittstellen, die wieder miteinander verknüpft werden können. Vor diesem Hintergrund und der funktionsorientierten Betrachtungsweise soll eine Modularisierungsmethode gewählt werden, die für alle Materialflussfunktionen angewendet und somit auf alle einsetzbaren Materialflusssysteme übertragbar ist. Der im Folgenden gewählte Modularisie-

rungsansatz orientiert sich im wesentlichen auf die im Kapitel 3.1.2 beschriebenen Komponenten der Materialflussfunktionen Transportieren, Lagern und Handhaben.

Entsprechend den Anforderungen und Kennwerten werden die Subsysteme aus einzelnen Technikmodulen aufgebaut, die zur Planung und Erfüllung der Materialflussfunktion zur Verfügung stehen. Die Technikmodule werden gemäß der Methodik und den Eigenschaften der funktionsorientierten Modularisierung, die in Tabelle 5-3 detailliert aufgeführt sind, gebildet. Jedes Technikmodul erfüllt innerhalb des zu gestaltenden Subsystems eine spezielle Teilfunktion, die unabhängig von allen angrenzenden Technikmodulen durchgeführt werden kann. Dem Planer steht nun für jedes Subsystem ein Baukasten zur Verfügung, aus dem dieser beliebige den Anforderungen entsprechende Technikmodule auswählen und kombinieren kann. Eine Auflistung der Eigenschaften eines Technikmoduls ist in Tabelle 5-6 dargestellt.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Beschreibung eines Subsystems und eines Technikmoduls liegt in der Angabe der Koordinaten. Bei einem Technikmodul, das unabhängig von Anwendungsfall und Einsatzort beschrieben werden soll, werden nur die relativen Koordinaten verwendet. Ein Subsystem dagegen, das sich anwendungsbezogen aus den einzelnen Technikmodulen zusammensetzen lässt, wird immer mit der Angabe der absoluten Koordinaten beschrieben.



<b>Technikmodul</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bestandteil eines Subsystems; Kombination einzelner Technikmodule ergeben Subsystem</li> <li>• Erfüllung genau einer Teilfunktion in Bezug auf das Subsystem</li> <li>• Fixes Potenzial, Leistungsumfang genau definiert (Abmaße, Gewicht, Geschwindigkeiten, ...)</li> <li>• Standardisierte, mechatronische Schnittstellen (Mechanisch, energetisch, informatorisch)</li> <li>• Technikmodule getrennt planbar und entwickelbar</li> <li>• Unabhängig von Einsatzort und –zweck anwendbar, standortübergreifender Austausch</li> <li>• Besteht aus einzelnen Submodulen</li> <li>• Beschreibung durch Relativkoordinaten</li> <li>• Hinzufügen und Wegnahme von einzelnen Technikmodulen jederzeit möglich</li> </ul>

Tabelle 5-6: Charakteristik und Eigenschaften eines Technikmoduls

Für die Funktion „Transportieren“ erfolgt gemäß der Bestandteile eines Transportsystems und deren auszuführenden Funktionen (vgl. Kapitel 3.1.2.1) eine Strukturierung in die Technikmodule Transportmittel (Teilfunktion: Transport von A nach B), Transportstrecke (Teilfunktion: Fahrweg) und Übergabepplätze (Teilfunktion: Speichern) (vgl. Abbildung 5-13). Mit Hilfe dieser Technikmodule lässt sich das Subsystem so zusammensetzen, dass die gestellten Anforderungen genau erfüllt und die lokalen Kennwerte eingehalten werden. Falls ein Flexibilitätspotenzial durch das Kriterium „Erweiterungsfähigkeit“ erhöht werden soll, können einzelne, systemeigene Technikmodule hinzugefügt werden, um somit das Subsystem an die veränderten Rahmenbedingungen anzupassen. Bei der Betrachtung des Technikmoduls Transportmittel wird nochmals zwischen den beiden Submodulen Fahrzeug (Teilfunktion: Bewegen) und Lastaufnahmemittel (Teilfunktion: Handling) unterschieden. Diese Unterscheidung ist insbesondere für die Planung sinnvoll, die Funktionsfähigkeit und somit ein eigenständiger Testbetrieb ist jedoch nur durch die Kombination aus den beiden Bestandteilen gewährleistet.

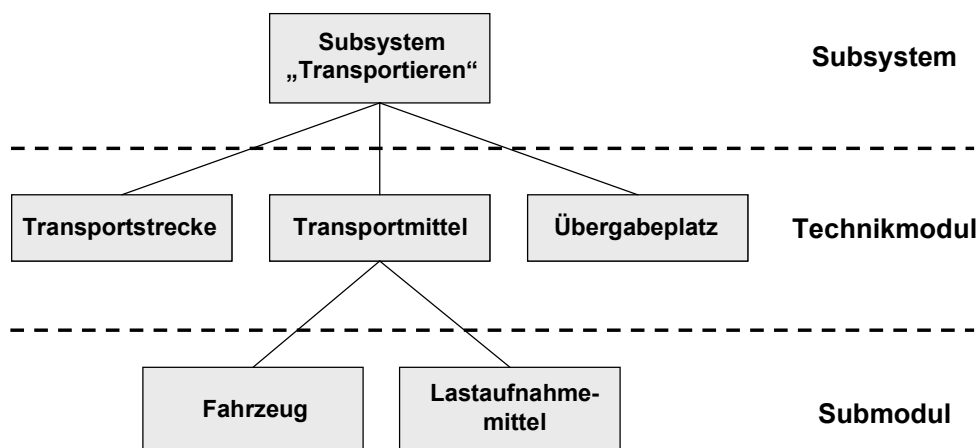


Abbildung 5-13: Technikmodule der Funktion „Transportieren“

Bei einigen Subsystemen, wie z.B. einer Rollenbahn, ist eine Aufteilung in einzelne Technikmodule nicht möglich, da alle Teilfunktionen durch ein physisches Element ausgeführt werden. In diesem Fall lässt sich das Subsystem „Transportieren“ nur aus einer Technikmodulart zusammensetzen, die jedoch in unterschiedlichen Ausführungen (z.B. Länge) vorliegen.

Analog zur Betrachtungsweise bei der Funktion „Transportieren“ wird die Vorgehensweise auf die Materialflussfunktion „Lagern“ übertragen. Für die Funktion „Lagern“ erfolgt gemäß den Bestandteilen eines Lagersystems und deren auszuführenden Funktionen (vgl. Kapitel 3.1.2.2) eine Strukturierung in die Technikmodule Lagereinrichtung (Teilfunktion: Speichern der Lagereinheiten) und Lagerbedienung. Bei der Betrachtung des Technikmoduls Lagerbedienung wird nochmals zwischen den beiden Submodulen Fahrzeug (Teilfunktion: Transportieren) und Lastaufnahmemittel (Teilfunktion: Handling) unterschieden, da eine Unterscheidung zwischen den beiden Submodulen insbesondere für die Planung sinnvoll ist, aber die Funktionsfähigkeit analog zur vorgestellten Modularisierung der Funktion „Transportieren“ nur durch die Kombination aus den beiden Bestandteilen gewährleistet ist.

Am Beispiel eines automatischen Kleinteillagerlagers mit doppelttiefer Einlagerung sollen die einzelnen Technikmodule beschrieben werden. Die Lagerbedienung wird durch einen Mast mit einem Hub- und einem Fahrtrieb realisiert, der auf einer Schiene fährt. Auf dem Hubbalken des Mastes ist ein Lastaufnahmemittel befestigt, das KLT-Behälter doppelttief einlagern kann. Die Lagereinrichtung wird durch einen

Regalbau realisiert, der parallel zur Fahrschiene verläuft und zwei Behälter hintereinander aufnehmen kann.

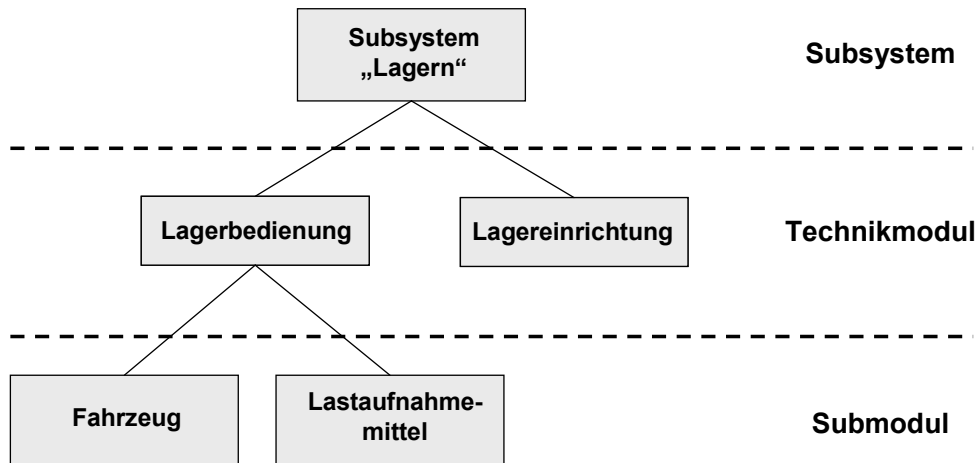


Abbildung 5-14: Technikmodule der Funktion „Lagern“

Wie bereits in Kapitel 3.1.2.3 ausführlich beschrieben, gliedert sich die Materialflussfunktion Handhaben in die Teilfunktionen Speichern, Menge verändern, Bewegen, Sichern und Kontrollieren. Die Teilfunktion Speichern ist keine typische Funktion des Handhabens, sondern erstreckt sich auf alle Bereiche der Materialflusssysteme. Berücksichtigt wird die Teilfunktion Speichern bei der Betrachtung der Materialflussfunktion Lagern. Kontrollieren hat bei der Funktion Handhaben den Charakter einer Hilfsfunktion, die eigentlich immer bei allen anderen Teilfunktionen mit auftritt, sobald ein Körper eine Änderung erfährt.

Für die Funktion „Handhaben“ erfolgt gemäß den Teilfunktionen eine Strukturierung in die Technikmodule Handlingseinrichtung und Fixiereinheit (Funktion: Speichern) (vgl. Abbildung 5-15). Bei der Betrachtung des Technikmoduls Handlingseinrichtung wird nochmals zwischen den beiden Submodulen Bewegungseinheit (Funktion: Bewegen) und Greifeinheit (Funktion: Sichern) unterschieden, da eine Aufteilung zwischen den beiden Submodulen insbesondere für die Planung sinnvoll ist, aber die Funktionsfähigkeit analog zur vorgestellten Modularisierung der Funktionen Transportieren und Lagern nur durch die Kombination aus den beiden Bestandteilen gewährleistet ist.

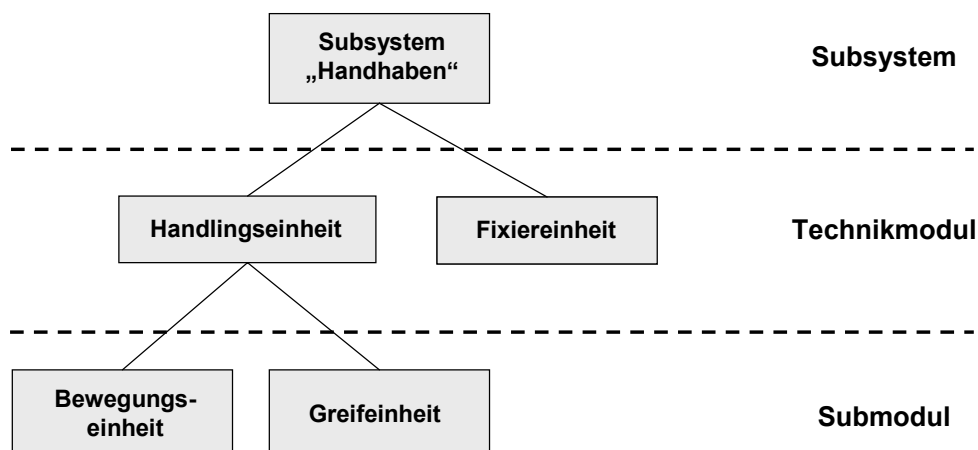


Abbildung 5-15: Technikmodule der Funktion „Handhaben“

Am Beispiel des Palettierens mit einem Roboter sollen die einzelnen Technikmodule für die Funktion „Handhaben“ beschrieben werden. Die Bewegungseinheit bildet ein Knickarmroboter mit einem Sauggreifer als Handlingseinheit. Als Fixiereinheit, die eine definierte Position der zu palettierenden Packstücke herstellen soll, fungiert eine Gruppierstation, die die Packstücke beliebig drehen und vordrehen kann.

### 5.4 Zusammenspiel Modularisierung und Wandelbarkeit

Im vorangegangenen Kapitel 5.3 wurde eine Methodik zur Modularisierung von Materialflusssystemen erarbeitet und dargestellt. Ausgehend von den für den jeweiligen Prozess benötigten Materialflussfunktionen wurden auf Basis der Flexibilitätsanforderungen entsprechende geeignete Subsysteme ausgewählt. Diese Subsysteme wurden anschließend aus den Technikmodulen so konfiguriert und zusammengesetzt, dass die lokalen Kennwerte samt den Flexibilitätsanforderungen erfüllt wurden.

Die Subsysteme werden auf Basis der lokalen Anforderungen aus den einzelnen Technikmodulen zusammengesetzt und besitzen somit ein Mindestpotenzial an Flexibilität. Da sich, wie in den vorangegangenen Kapitel ausführlich beschrieben, die Unternehmen in einem zunehmend turbulenten Umfeld befinden, ist es in einigen Fällen möglich, dass das vorgehaltene Flexibilitätspotenzial nicht mehr ausreicht. Tritt dieser Fall ein, bestehen mit der zu Grunde liegenden Modularisierungsmethodik zwei unterschiedlich Ansätze, um das Flexibilitätspotenzial anzupassen (siehe

auch Kapitel 4.2.2). Die beiden möglichen Ansätze Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit sind in Abbildung 5-16 dargestellt.

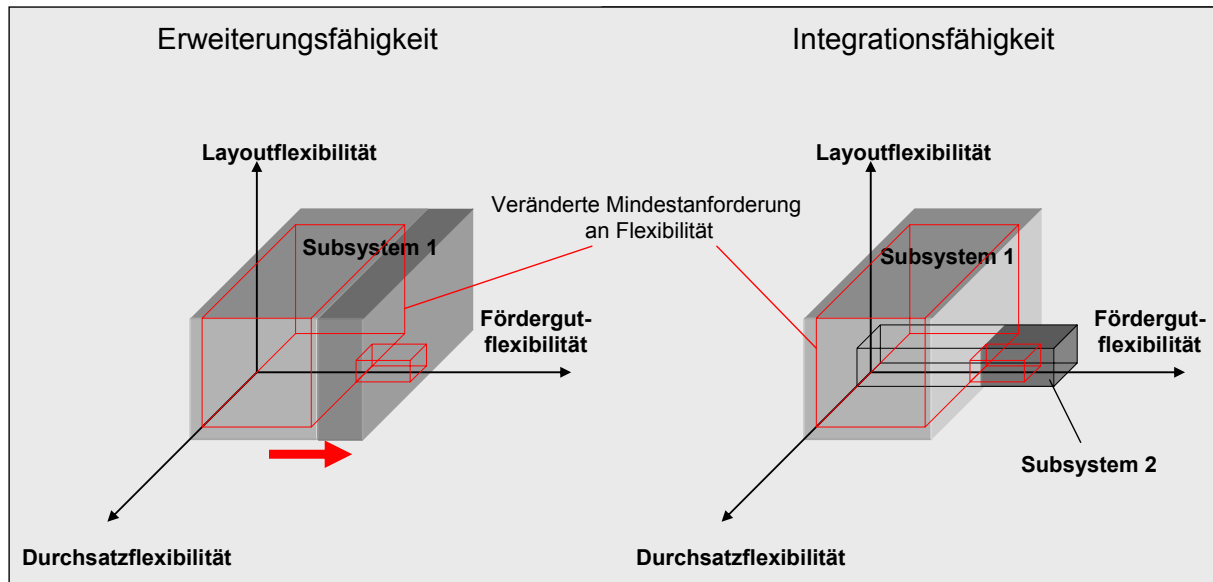


Abbildung 5-16: Möglichkeit einer Flexibilitätserhöhung durch modulare Materialflusssysteme

Eine Möglichkeit besteht darin, das bestehende Subsystem mit systemeigenen Technikmodulen auszubauen (= Erweiterungsfähigkeit), um damit das Flexibilitätspotenzial auf das geforderte Maß zu erhöhen. Exemplarisch für die Materialflussfunktion „Transportieren“ ist der Einfluss der einzelnen Technikmodule Fahrzeug, Lastaufnahmemittel, Fahrweg und Übergabepplatz auf die Flexibilitätskriterien in Tabelle 5-7 dargestellt. Somit ist es möglich, durch das Hinzufügen oder Verändern von Technikmodulen, die Flexibilitätsanforderungen anzupassen. Ein direkter Einfluss liegt vor, wenn das Technikmodul unmittelbar die Eigenschaft des Flexibilitätskriteriums bestimmt. Liegt ein indirekter Einfluss vor, beeinflusst das Technikmodul zwar die Flexibilität, aber nicht direkt den Wert des Flexibilitätskriteriums.

Technikmodule \ Flexibilitätsart	Layout	Durchsatz	Fördergut
Fahrzeug	○	●	◐
Lastaufnahmemittel	○	●	●
Transportstrecke	●	◐	○
Übergabepplätze	●	◐	●

○ Kein Einfluss  
 ◐ Indirekter Einfluss  
 ● Direkter Einfluss

Tabelle 5-7: Einfluss der Technikmodule der Funktion „Transportieren“ auf die Flexibilitätsarten Layout, Durchsatz und Fördergut

Ist eine Anpassung der Flexibilität mit systemeigenen Technikmodulen nicht mehr möglich, kann die Materialflussfunktion unter Hinzunahme eines weiteren, anderen Subsystems ergänzt werden. In diesem Fall wird das Wandelbarkeitskriterium „Integrationsfähigkeit“ herangezogen. Eine Integration von weiteren Subsystemen macht aber nicht nur in diesen Fällen Sinn, in denen das bestehende System an seine Leistungsgrenzen stößt, sondern es kann sich durch den Einsatz eines anderen Subsystems eine weitaus bessere Gesamtlösung ergeben. Wird eine Erhöhung eines Flexibilitätskriteriums nur durch einen speziellen Anwendungsfall erforderlich, kann sich durch ein gezieltes Hinzufügen eines weiteren Subsystems eine weitaus wirtschaftlichere Gesamtlösung ergeben als bei einer Erweiterung des bestehenden Systems (vgl. Abbildung 5-16).

## 5.5 Modularisierung am Beispiel einer Elektrohängebahn/Hängekransystem

Am Beispiel der beiden Subsysteme Elektrohängebahn und Hängekransystem soll die für die Materialflussfunktion „Transportieren“ erarbeitete Modularisierungsmethodik näher erläutert werden. Die einzelnen Technikmodule der beiden Subsysteme

## 5.5 Modularisierung am Beispiel einer Elektrohängebahn/Hängekransystem

wurden in der Versuchsanlage des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München umgesetzt (siehe Abbildung 5-17).

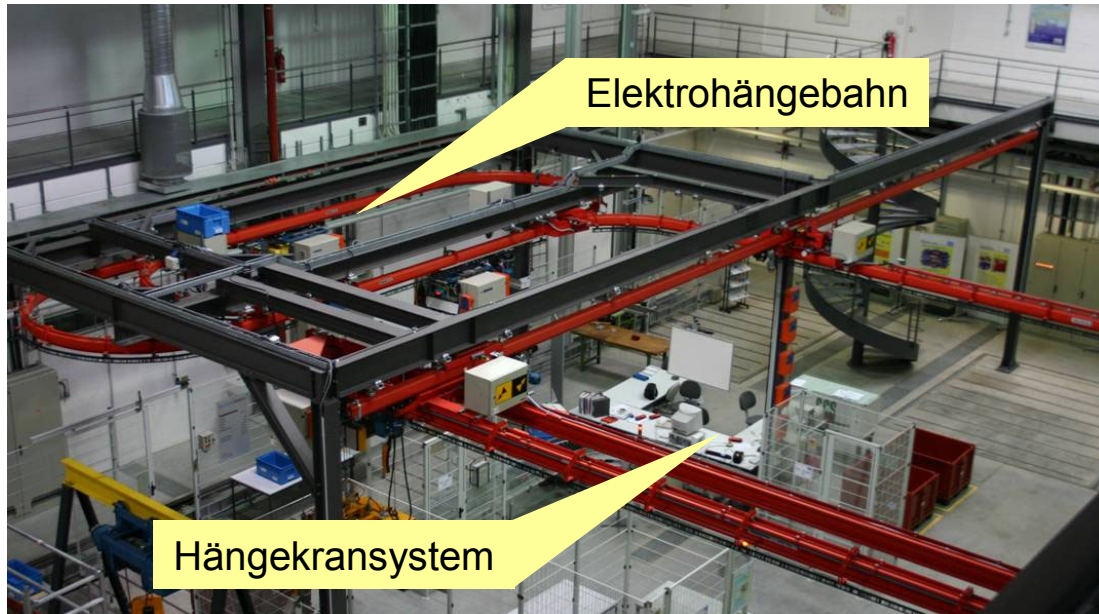


Abbildung 5-17: Versuchsanlage am Lehrstuhl fml

Die zu Grunde liegende Versuchsanlage besteht aus zwei Bereichen. Ein Bereich wird durch ein Hängekransystem bedient, wodurch eine flächenmäßige Bedienung der Übergabepunkte möglich ist und der somit die höchste Layoutflexibilität aufweist (vgl. Abbildung 4-13). Der zweite Bereich wird durch eine Elektrohängebahn angeschlossen. Zwischen beiden Bereichen besteht eine Verbindung, so dass eine Überfahrt der eingesetzten Transportmittel möglich ist.

Gemäß der erarbeiteten Modularisierungsmethode aus dem vorangegangenen Kapitel 5.3.3.2 setzt sich ein Subsystem für die Funktion Transportieren aus den Technikmodulen Transportstrecke, Übergabepunkte und Transportmittel zusammen, wobei sich letztgenanntes Technikmodul aus der Kombination der Submodule Fahrzeug und Lastaufnahmemittel ergibt. Für die beiden Subsysteme Hängekran und Elektrohängebahn sind in Tabelle 5-8 und Tabelle 5-9 alle in der Versuchsanlage eingesetzten Technikmodule aufgeführt.

Technikmodule	Ausführungsbeispiel
<b>Transportmittel</b>	
Fahrzeug	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einträgerkrankatze</li> <li>• Zweiträgerkrankatze</li> </ul>
Lastaufnahmemittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatisches Lastaufnahmemittel für VDA-KLT-Behälter (600 x 400)</li> <li>• Manuelles Lastaufnahmemittel für VDA-KLT-Behälter (600 x 400)</li> <li>• Automatisches Lastaufnahmemittel für Großladungsträger (1200x1000)</li> </ul>
<b>Übergabepätze</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rollenbahn</li> <li>• Passiver Übergabepatz</li> <li>• Aktiver Übergabepatz</li> </ul>
<b>Transportstrecke</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrschienen (Kurven, Geraden) unterschiedlicher Länge und Radien</li> <li>• Verzweigungen (Weichen, Kreuzungen,...)</li> <li>• Vertikale Umsetzeinrichtungen (Etagenförderer, Hub-/Senkstation)</li> </ul>

Tabelle 5-8: Technikmodule für das Subsystem Elektrohängebahn



## 5.5 Modularisierung am Beispiel einer Elektrohängebahn/Hängekransystem

Technikmodule	Ausführungsbeispiel
<b>Transportmittel</b>	
Fahrzeug	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einträgerkrankatze</li> <li>• Zweiträgerkrankatze</li> </ul>
Lastaufnahmemittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatisches Lastaufnahmemittel für VDA-KLT-Behälter (600 x 400)</li> <li>• Manuelles Lastaufnahmemittel für VDA-KLT-Behälter (600 x 400)</li> <li>• Automatisches Lastaufnahmemittel für Großladungsträger (1200x1000)</li> </ul>
<b>Übergabeplätze</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rollenbahn</li> <li>• Passiver Übergabeplatz</li> <li>• Aktiver Übergabeplatz</li> </ul>
<b>Transportstrecke</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einträgerhängekran</li> <li>• Zweiträgerhängekran</li> </ul>

Tabelle 5-9: Technikmodule für das Subsystem Hängekransystem

Für die Durchführung der Teilfunktion „Transport von A nach B“ stehen sowohl dem Subsystem Hängekran als auch dem System Elektrohängebahn die gleichen Fahrzeuge zur Verfügung, da in beiden Systemen die jeweils gleichen Fahrbahnprofile zugrunde liegen (vgl. Abbildung 5-18). Die Lastaufnahme der Einträgerkrankatze kann entweder automatisch als auch manuell erfolgen. In beiden Fällen kann ein VDA-KLT-Behälter mit dem Abmaß 600x400 mm gehandelt werden. Die Zweiträgerkrankatze verfügt über ein Lastaufnahmemittel, das einen Großladungsträger handeln kann. Die Anbindung des Lastaufnahmemittels an das Hubseil der Zweiträgerkrankatze erfolgt mittels eines Adapters, mit dem auch eine Nutzung des Lastaufnahmemittels für VDA-KLT-Behälter möglich wird.

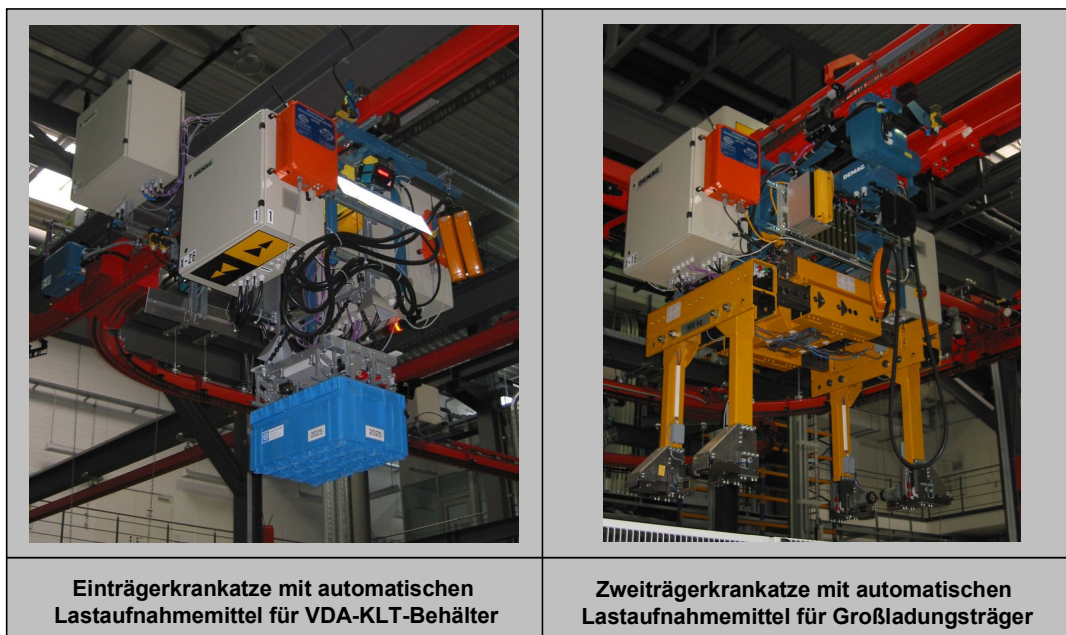


Abbildung 5-18: Transportmittel inkl. Lastaufnahmemittel

Die Übergabeplätze stellen einen wichtigen Bestandteil des Materialflusssystem dar, da sie die Schnittstellen zu anderen Subsystemen bzw. Produktionseinrichtungen bilden. Basierend auf den Anforderungen an die Wandelbarkeit müssen Übergabestellen die in Tabelle 5-10 aufgeführten Eigenschaften besitzen.

Ausgehend von der aufgeführten Anforderungsliste wurden zwei grundsätzliche Konzepte für einen passiven und einen aktiven Übergabeplatz entwickelt. Ein passiver Übergabeplatz dient zur passiven Behälteraufnahme. Er zeichnet sich durch den einfachen Aufbau, einer damit verbundenen kostengünstigen Herstellung und durch seine Mobilität aus (vgl. Abbildung 5-19).

<b>Eigenschaften Technikmodul Übergabeplatz</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• funktionsorientiert modularisiert</li><li>• leicht verschiebbar</li><li>• universell einsetzbar</li><li>• manuelle und automatische Bedienung</li><li>• leicht und schnell umrüstbar</li><li>• Variabilität der Positioniersysteme</li><li>• Bedienung von oben und den Seiten</li><li>• muss den geforderten Kapazitäten entsprechen</li><li>• direkter Datenaustausch zwischen allen Materialflusssystemen und der Übergabestation muss gewährleistet werden</li><li>• Identifikation des Fördergutes</li></ul>

Tabelle 5-10: Eigenschaften des Technikmoduls Übergabeplatz

Der aktive Übergabeplatz besteht aus einem Drehtisch, auf dem sich ein Rollenförderer für die Längsaufnahme und ein kreuzender Tragkettenförderer für die Queraufnahme von Ladehilfsmitteln befinden. Dies bietet die Möglichkeit, Behälter quer und längs an unterschiedlichen Positionen auf und abzugeben, sogar, falls nötig, mit Änderung der Ausrichtung. Er bietet Puffermöglichkeiten und eine gleichzeitige Auf- und Abgabe von Lasten. Dabei kann er sowohl von flurgebundenen als auch von flurfreien, Stetig- und Unstetigförderern bedient werden (FTS, EHB, Brückenkran, Rollenbahn, Stapler, ...). Der aktive Übergabeplatz kann Behältergrößen bis zu 1200x600 mm aufnehmen. Für die Aufnahme von größeren Behältertypen (z.B. Gitterbox, Europalette) ist eine Aufnahmevorrichtung integriert, die eine passive Übergabe gewährleistet. Dieser Aufbau erfüllt sehr gut die Anforderungen an die Wandelbarkeit (vgl. Abbildung 5-19).

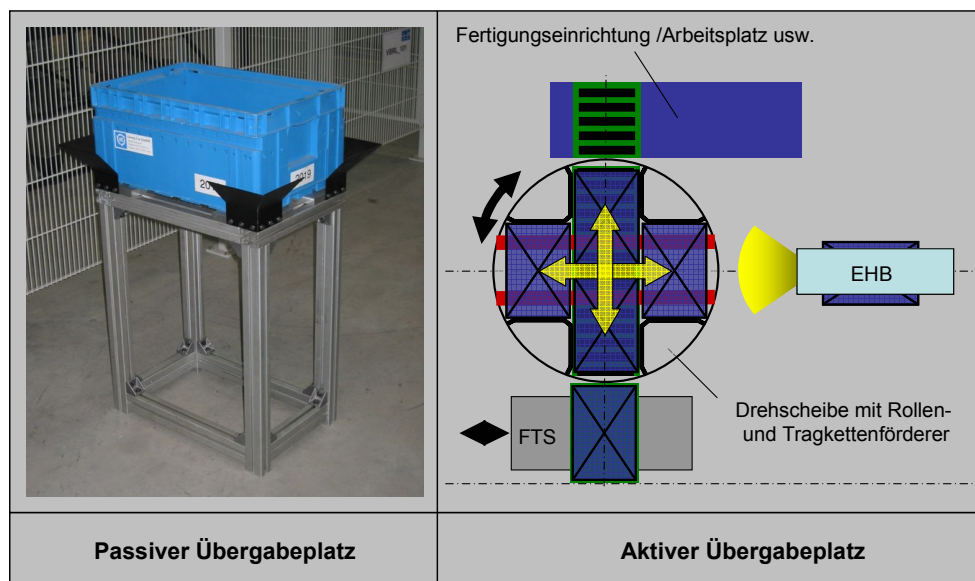


Abbildung 5-19: Ausführungsbeispiele von Übergabeplätzen

Durch die Fähigkeit des aktiven Übergabeplatzes, mehrere Behältertypen aufnehmen zu können, und die Größe und Anzahl der Behälter in einer Dimension variabel ist (1-D), zeichnet er sich im Vergleich zu dem passiven Übergabeplatz durch eine wesentliche höhere Fördergutflexibilität aus. Darüber hinaus bietet der aktive Übergabeplatz eine höhere Durchsatzflexibilität, da gleichzeitig mehrere Behälter gepuffert werden können. In Punkto Layoutflexibilität zeichnen sich beide Übergabeplätze durch ihre hohe Mobilität aus.

### 5.6 Zusammenfassung

Aufbauend auf den Grundlagen der allgemeinen Systemtheorie wird als erster Schritt eine hierarchische Strukturierung der Fabrikstrukturen und –prozesse gewählt. Für die so entstandenen Bereiche und Prozesse werden die dort benötigten Materialflussfunktionen, die in die Funktionen Transportieren, Lagern und Handhaben untergliedert sind, ausgewählt und die lokalen Kennwerte für diese Funktionen bestimmt. Auf Basis der in den lokalen Kennwerten hinterlegten Kennzahlen und Flexibilitätskriterien werden zur Erfüllung der geforderten Materialflussfunktionen geeignete Subsysteme ausgewählt. Dabei kann eine Funktion durch mehrere verschiedenartige Subsysteme erfüllt werden. Nach der Auswahl von geeigneten Subsystemen werden diese auf Basis der lokalen Kennwerte aus einzelnen Technikmodulen zusammengesetzt. Die Strukturierung in Technikmodulen erfolgt nach dem Ansatz der funkti-

ensorientierten Modularisierung. Unter Verwendung der vorgestellten Methodik zur Modularisierung können somit Subsysteme aus Technikmodulen zusammengesetzt werden, die alle geforderten technischen Kennzahlen und die Flexibilitätsanforderungen erfüllen. Da sich, wie in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich beschrieben, die Unternehmen in einem zunehmend turbulenten Umfeld befinden, ist es in einigen Fällen möglich, dass das vorgehaltene Flexibilitätspotenzial nicht mehr ausreicht. Tritt dieser Fall ein, bestehen mit der zu Grunde liegenden Modularisierungsmethodik zwei unterschiedliche Ansätze, um das Flexibilitätspotenzial anzupassen. Als erste Möglichkeit kann das eingesetzte Subsystem durch systemeigene Technikmodule erweitert und an die neuen Flexibilitätsanforderungen angepasst werden. Ist dies aus technischer Sicht nicht mehr möglich oder wirtschaftlich nicht sinnvoll, kann zusätzlich neben dem ursprünglichen Subsystem ein zusätzliches systemfremdes Subsystem die Flexibilität erhöhen. In beiden Fällen können somit gezielt die drei Flexibilitätskriterien angepasst werden.

Auf Basis der erarbeiteten Modularisierungsmethodik gilt es für die Technikmodule eine standardisierte Beschreibung zu entwickeln, die sowohl für den Planer eine Unterstützung darstellt als auch für die Steuerung der Materialflusssysteme eingesetzt werden kann. Somit existiert für jedes Technikmodule eine einheitliche, eindeutige Datenbasis, die Voraussetzung für einen durchgängigen, ortsübergreifenden Einsatz ist und in der alle innerhalb eines Lebenszyklus eines Technikmoduls notwendigen Daten gespeichert werden.



## **6 Standardisierte Modulbeschreibung**

In den vorangegangenen Kapitel wurde eine Methodik zur Modularisierung von wandelbaren Materialflusssystemen erarbeitet. Um die geschaffenen modularisierten Bausteine für die Planung und die Steuerung von Materialflusssystemen nutzbar zu machen, bedarf es einer standardisierten Beschreibung. Die Modulbeschreibung, die gleichermaßen für Technikmodule und Subsysteme gültig ist, muss so aufgebaut sein, dass sowohl der Planer für die Planungsphase als auch die Steuerung im laufenden Betrieb die notwendigen Informationen entnehmen kann.

Aufbauend auf die Standardisierung der Modulbeschreibung wird anschließend eine Datensprache ausgewählt, die sowohl der Planer als auch die Steuerung lesen kann.

### **6.1 Aufbau der Modulbeschreibung am Beispiel der Funktion „Transportieren“**

Wie bereits dargestellt, gilt es in diesem Kapitel eine Methode für eine Standardisierte Beschreibung der einzelnen Module zu entwickeln. Eine standardisierte Beschreibung soll sowohl für die einzelnen Technikmodule als auch für die Beschreibung der Subsysteme, die sich aus den einzelnen Technikmodulen zusammensetzen, gelten. Als oberste Prämisse für eine Modulbeschreibung gilt, dass sowohl alle für die Planung als auch für die Steuerung notwendigen Daten der Beschreibung zu entnehmen sind und so als ein Effekt eine redundante Datenhalten vermieden wird.

Am Beispiel der Materialflussfunktion Transportieren soll für die Technikmodule und die Subsysteme eine derartige Beschreibung entwickelt werden. Die Beschreibung soll allgemein aufgebaut werden, dass die Voraussetzungen für eine Übertragung auf alle anderen Materialflussfunktionen gewährleistet sind.

### 6.1.1 Modulbeschreibung für Technikmodule

Die Charakteristik und Eigenschaften eines Technikmoduls wurden in Kapitel 5.3.3.2 ausführlich beschreiben (vgl. auch Tabelle 5-6). Technikmodule erfüllen genau eine Teilfunktion innerhalb der betrachteten Materialflussfunktionen. Das Potenzial und die technischen Daten sind genau definiert und unabhängig von dem jeweiligen Einsatzort oder –zweck. Vor- und nachgeschaltete Module beeinflussen nicht die Eigenschaften des betrachteten Technikmoduls.

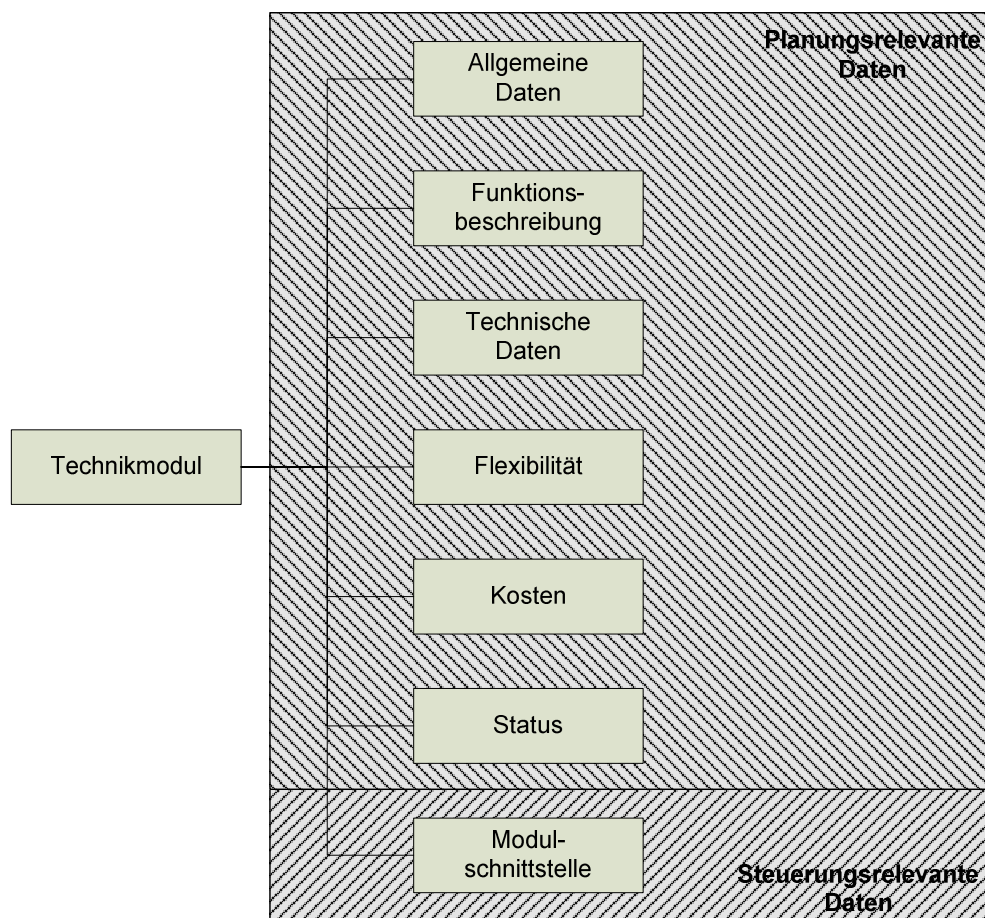


Abbildung 6-1: Aufbau und Struktur der Modulbeschreibung für ein Technikmodul

Die Datenstruktur und der Aufbau einer Technikmodulbeschreibung müssen so gestaltet sein, dass sowohl für den Planer als auch für die Steuerung alle relevanten Daten hinterlegt sind. Die Datenstruktur lässt sich in die fünf Überpunkte allgemeine Daten, Funktionsbeschreibung, technische Daten, Flexibilität, Kosten, Status und Modulschnittstelle unterteilen.



Die ersten vier genannten Überpunkte enthalten alle für die Planung relevanten Daten. Der Überpunkt Modulschnittstelle ist überwiegend für die Steuerung relevant. Für den Überpunkt „Status“ sind sowohl für den Planer als auch für die Steuerung relevante Daten hinterlegt (vgl. Abbildung 6-1).

### Allgemeine Daten

Unter dem Überpunkt „Allgemein“ werden allgemeine Informationen über das jeweilige Modul abgelegt (vgl. Abbildung 6-2). Unter anderen werden hier der Modulname, die genaue Bezeichnung (Angabe mit ID) und der Hersteller abgelegt. Darüber hinaus finden sich hier Verweise auf weitere Datenquellen (CAD-Daten, Daten-/Typenblätter, Foto) und eine Kurzbeschreibung des Moduls.

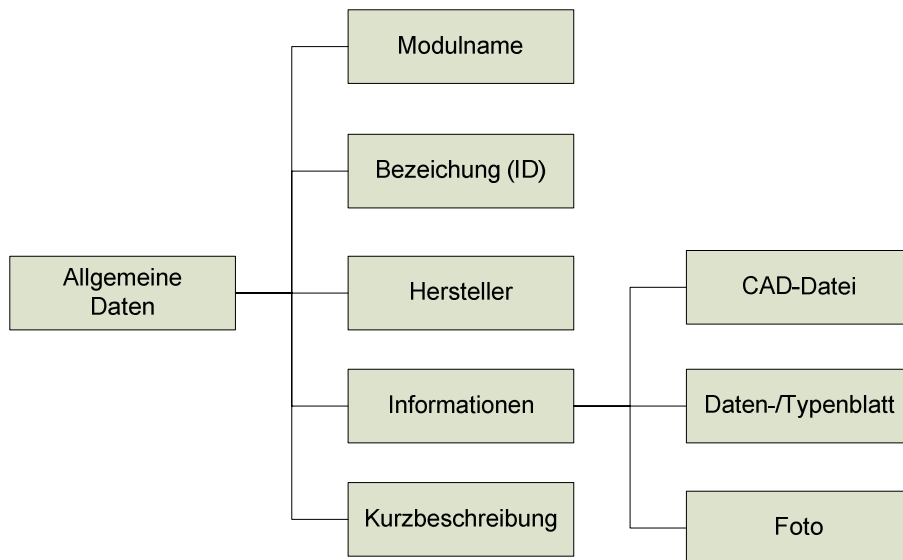


Abbildung 6-2: Datenstruktur für den Überpunkt „Allgemeine Daten“

### Funktionsbeschreibung

Der Überpunkt „Funktionsbeschreibung“ beinhaltet im Wesentlichen die Angabe der Materialflussfunktion, die diesem Technikmodul zugrunde liegt (vgl. Abbildung 6-3). Daneben erfolgt in diesem Punkt die Beschreibung der durch das Technikmodul ausgeführten Teilfunktion. Da es sich bei dieser standardisierten Datenstruktur um ein allgemeingültiges Modell für alle Technikmodule handelt, ist die Angabe der durchzuführenden Teilfunktion besonders wichtig. Je nach Art des Technikmoduls werden gewisse Bestandteile in der Datenstruktur nicht benötigt und deshalb ausgeblendet. Ist bei einem Materialflusssystem keine Unterscheidung zwischen einzelnen Technikmodulen möglich (z.B. bei einer Rollenbahn, vgl. Kapitel 5.3.3.2), werden in diesem Fall alle Teilfunktionen aktiviert.

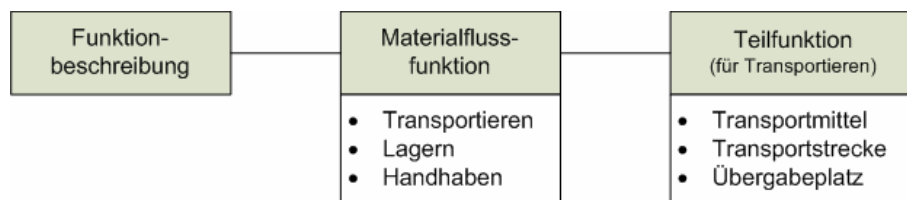


Abbildung 6-3: Datenstruktur für den Überpunkt „Funktionsbeschreibung“

### Technische Daten

Der Überpunkt „Technische Daten“ stellt für den Planungsvorgang alle wichtigen Daten und Informationen zur Verfügung. Bei der Datenstruktur, die den technischen Daten hinterlegt ist, wird bei der Funktion „Transportieren“ zwischen den Technikmodulen Transportmittel, Transportstrecke und Übergabepplatz unterschieden. In Abhängigkeit von der Auswahl der entsprechenden Teilfunktion, die das Technikmoduls ausgeführt, wird in dem Überpunkt „Funktionsbeschreibung“ die entsprechende Datenstruktur in den „Technischen Daten“ aktiviert (vgl. Abbildung 6-4).

Technische Daten, die allen Technikmodulen gemeinsam sind, werden unter dem Element <Allgemeingültige Daten> abgelegt. Neben Modulabmessungen und dem Gewicht findet sich hier auch die Angabe der Verfügbarkeit. Falls das betrachtete Technikmodul zum ersten Mal verwendet wird, können für die Verfügbarkeit Erfahrungswerte aus anderen, ähnlichen Modulen eingesetzt werden. Befindet sich das Technikmodul schon seit einiger Zeit im Einsatz, kann auch der exakte Wert, der sich aus Einsatzzeit und Ausfallzeit berechnet, abgelegt werden. Die Werte zur Be-

stimmung der exakten Verfügbarkeit, werden im Überpunkt „Status“ dokumentiert (siehe auch bei Definition für den Überpunkt „**Status**“).

Die technischen Daten für das verwendete Transportmittel enthalten neben der Geschwindigkeit und Förderhöhe auch Angaben zu den handelnden Ladehilfsmitteln. Dabei ist es durchaus möglich mehrere Typen anzugeben, falls es sich um ein Mehrfachlastaufnahmemittel handelt. Die Technikmodule der Transportstrecke werden durch den Streckenverlauf, die Streckenhöhe und die maximal zulässige Traglast beschrieben.

Analog zu den Transportmitteln können auch bei der Beschreibung der Übergabepunkte Typ und Anzahl der Ladehilfsmittel angegeben werden, die durch den Übergabepunkt aufgenommen werden können. Darüber hinaus erfolgt eine Klassifizierung des Übergabepunktes hinsichtlich aktiver und passiver Ausführung der Lastauf- und -abgabe (siehe Kapitel 5.5). Falls es sich um einen aktiven Übergabepunkt handelt, wird das Element <Puffergröße> aktiviert und dort die Eigenschaften und die Größe der Pufferfunktion beschrieben.

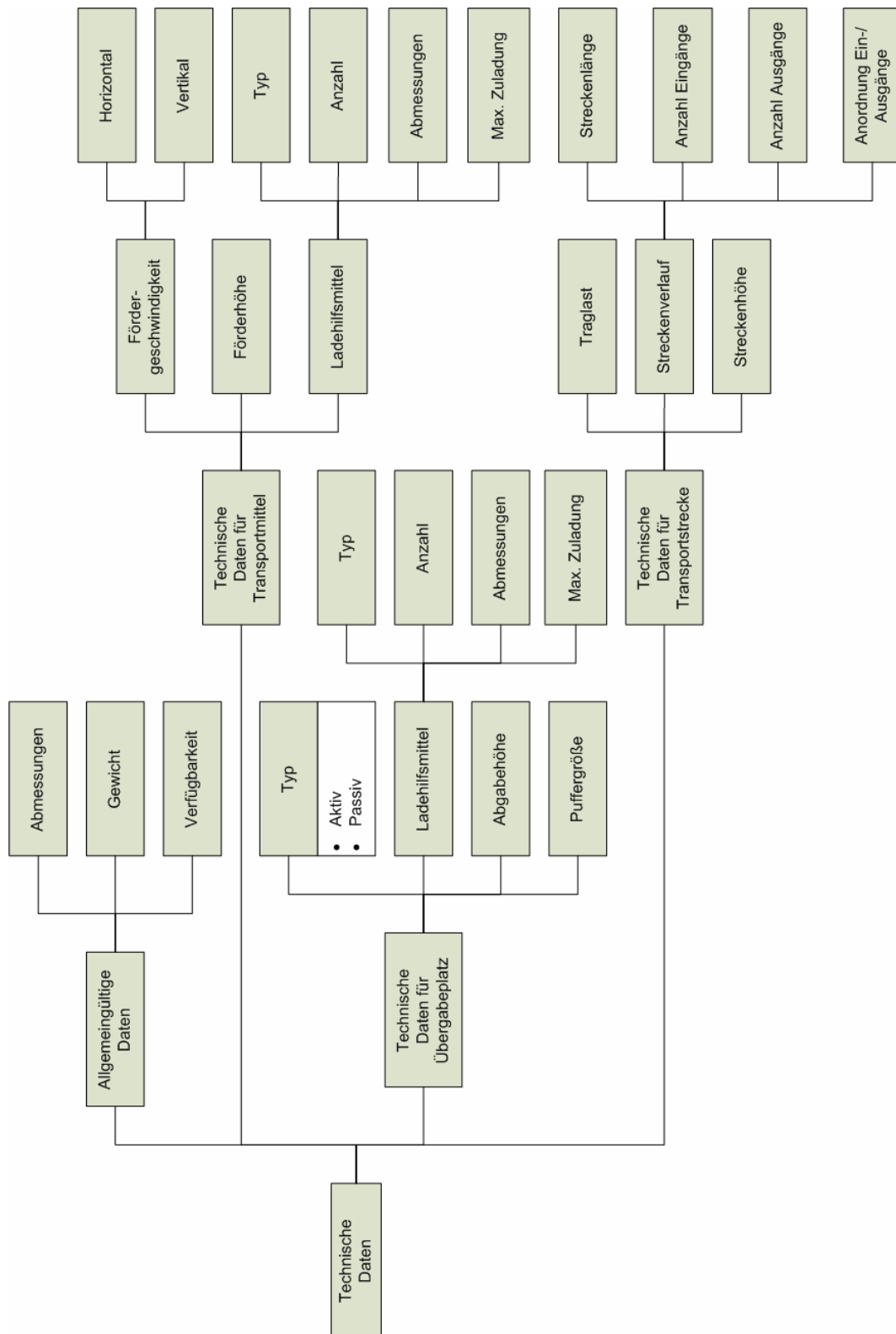


Abbildung 6-4: Datenstruktur für den Überpunkt „Technische Daten“

### Flexibilität

Bei der Beschreibung der Technikmodule hinsichtlich der beinhalteten Flexibilitätspotenziale werden die in Kapitel 4.3 erarbeiteten Kriterien für die Bewertung der Layout-, Durchsatz- und Fördergutflexibilität verwendet. Die Kriterien und die Datenstruktur der Flexibilität zeigt Abbildung 6-5.

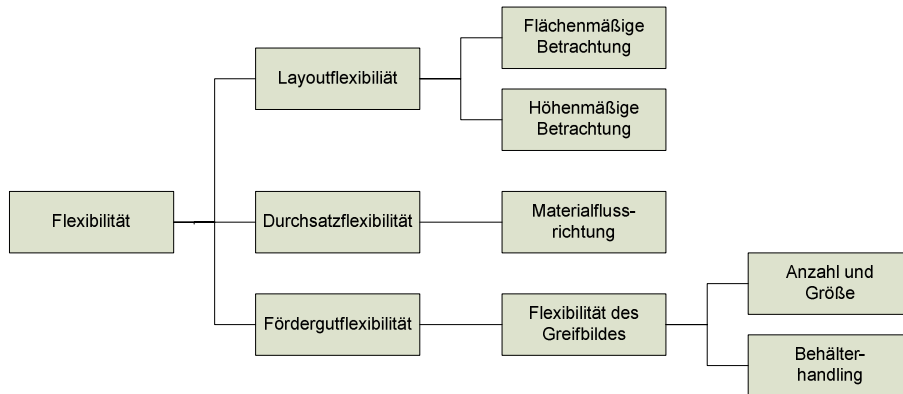


Abbildung 6-5: Datenstruktur für den Überpunkt „Flexibilität“

Flexibilitätsart Technikmodule	Layout	Durchsatz	Fördergut
Transportmittel	○	●	●
Transportstrecke	●	▨	○
Übergabeplätze	●	▨	●

○ Kein Einfluss  
 ▨ Indirekter Einfluss  
 ● Direkter Einfluss

Tabelle 6-1: Zusammenhang Technikmodul und Flexibilitätsart

Da nicht alle Flexibilitätsarten gleichermaßen von allen Technikmodulen beeinflusst werden, sollen alle Kriterien, die keinen direkten Einfluss auf die Flexibilitätskriterien haben, bei der Beschreibung des Technikmoduls ausgeblendet werden. Der Zu-

sammenhang zwischen den einzelnen Technikmodulen und den Flexibilitätsarten wurde in Kapitel 5.4 erarbeitet und wird in Tabelle 6-1 nochmals zusammengefasst.

### Kosten

In dem Überpunkt Kosten werden die Investitions-, Inbetriebnahme-, Energie-, Betriebsstoff- und Wartungskosten zusammengefasst (vgl. Abbildung 6-6). Da die Energie- und Betriebsstoffkosten einen ausgeprägten Standortbezug haben, wird in der Beschreibung nur der entsprechende Verbrauch hinterlegt. Der Kostenwert ergibt sich aus der Multiplikation der vor Ort geltenden Energie- und Betriebsstoffkostensätze, die in der Beschreibung des Subsystems (vgl. Kapitel 6.1.3) hinterlegt werden. Analog ist die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Inbetriebnahme- und Wartungskosten. Auch in diesem Fall wird nur der Aufwand in Form von Stunden hinterlegt und anschließend mit den entsprechenden Stundensätzen multipliziert.

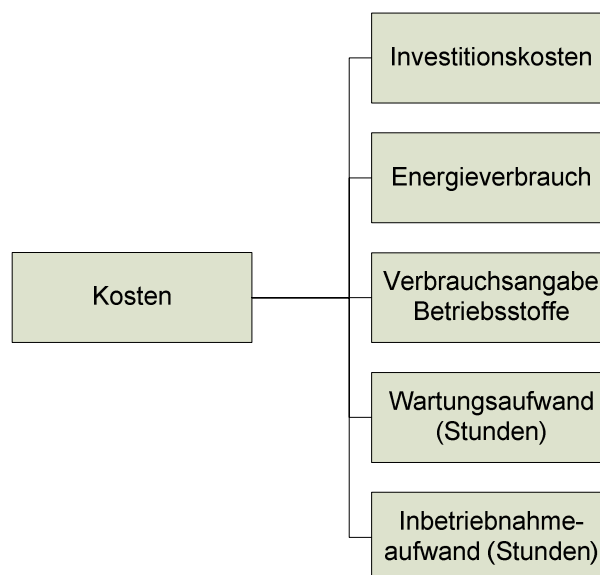


Abbildung 6-6: Datenstruktur für den Überpunkt „Kosten“

### Status

Unter dem Überpunkt „Status“ kann der aktuelle Zustand des Moduls abgefragt werden. Die Datenstruktur des Überpunktes „Status“ ist in Abbildung 6-7 dargestellt. Neben der Betriebsart (Initialisierung, Fehler-, Notausituation, Bereit) werden dort Informationen über den jeweiligen Planungs- (Grobplanung, Feinplanung, Aufbau-

## 6.1 Aufbau der Modulbeschreibung am Beispiel der Funktion „Transportieren“

phase, Inbetriebnahme, Abbauphase) und Betriebszustand (Manuell, Automatik) abgelegt. Darüber hinaus werden unter Status alle das Technikmodul betreffenden Zustände dokumentiert. Neben der Auflistung aller Inbetriebnahmen und Planungen werden hier insbesondere die Wartungen und Störungen berücksichtigt. Die beiden letztgenannten spielen bei der Berechnung der Verfügbarkeit eine besondere Rolle.

Die Bestimmung der Verfügbarkeit liefert eine Möglichkeit zur technischen Überprüfung der Funktions- und Leistungsfähigkeit des Systems. Im laufenden Betrieb werden alle Ausfälle mit Art und Dauer dokumentiert, um daraus die Verfügbarkeit des technischen Elements zu bestimmen. Falls die Verfügbarkeit fällt, kann das Technikmodul überprüft werden, aus welchem Grund das Modul ausfällt, um darauf evtl. Optimierungen und Überarbeitungen in die Wege zu leiten. Gegebenenfalls ist ein Austausch des Technikmoduls erforderlich.

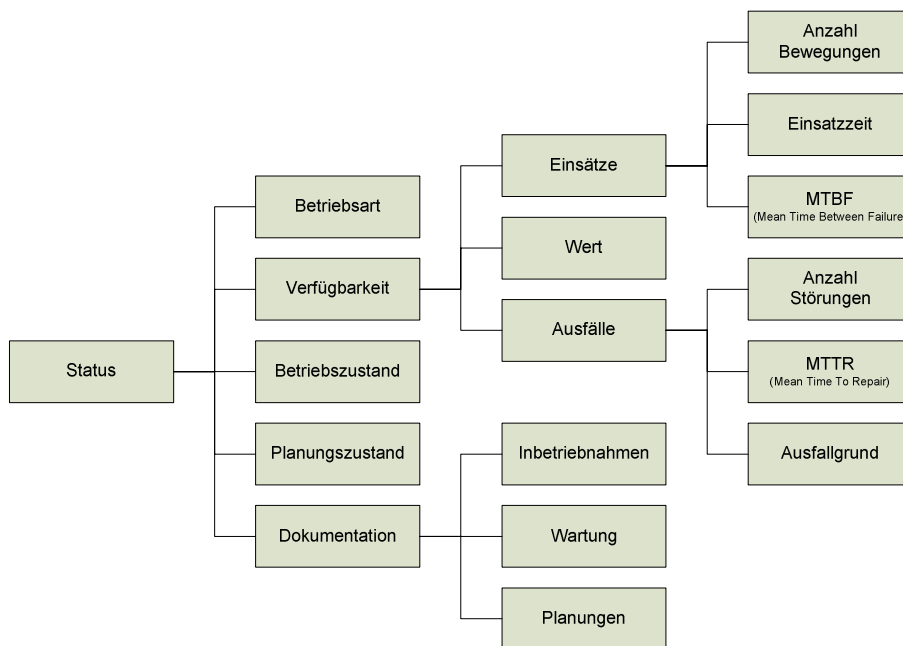


Abbildung 6-7: Datenstruktur für den Überpunkt „Status“

Die Verfügbarkeit berechnet sich nach der folgenden Formel [VDI-3649]:

$$\eta_{TM} = \frac{MTBF}{MTTR + MTBF}$$

Erläuterungen:

$\eta_{TM}$ : Teilverfügbarkeit des Technikmoduls

MTTR: Mean Time To Repair (Mittlere Ausfallzeit des Technikmoduls)

MTBF: Mean Time Between Failure (Mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen)

Nach ausreichender Betriebszeit kann der berechnete Wert für die Verfügbarkeit auch in den Überpunkt „Technische Daten“ aufgenommen werden (vgl. Abbildung 6-4). Somit steht der Verfügbarkeitswert dem Planer für Um- und Neuplanungen zur Verfügung.

Die Berechnung der Einzelverfügbarkeit der Technikmodule bildet die Voraussetzung für die Ermittlung der Gesamtverfügbarkeit des Subsystems, das in der Beschreibung des Subsystems erfolgt (Siehe Kapitel 6.1.3).

### 6.1.2 Modulschnittstelle

Unter dem Überpunkt „Modulschnittstelle“ sind alle Daten hinterlegt, die für eine Verbindung der einzelnen Module notwendig sind. Unterschieden wird dabei zwischen einer mechanischen, steuerungstechnischen und energetischen Schnittstelle [Wil-06].

#### 6.1.2.1 Mechanische Ebene der Modulschnittstelle

Die mechanische Ebene der Modulschnittstelle besteht aus den allgemeinen Anschlussmaßen wie z. B. der Befestigung des Moduls am Boden oder auch die konstruktive Beschreibung des Fahrwerkes eines Elektrohängenbahnfahrzeuges, damit dieses auf die Schiene passt (vgl. Abbildung 6-8). Des Weiteren werden hier die benötigten Betriebsmittel (Schmierstoffe, Werkzeuge etc.) aufgeführt.

Ferner gehört zu dem Element <Mechanik> das Unterelement <Fördergutschnittstelle>. Dieses Element definiert die förderguttechnische Seite der Modulschnittstelle. Diese Modulschnittstelle ist z. B. bei einem Lagermodul der E/A-Platz und bei einem EHB-Fahrzeug das Lastaufnahmemittel. Sollte das Modul über mehrere Fördergutschnittstellen verfügen, wird jede mit einem eigenen Element <Fördergutschnittstelle> charakterisiert. Das Element <Fördergutschnittstelle> beinhaltet die Bezeichnung des Übergabeplatzes und gibt an, ob es sich dabei um einen



## 6.1 Aufbau der Modulbeschreibung am Beispiel der Funktion „Transportieren“

Moduleingang, -ausgang oder um beides handelt (<SchnittstellenTyp>). Ein Moduleingang kann nur Waren aufnehmen und ein Modulausgang nur Waren abgeben. Ein Lastaufnahmemittel übernimmt nach dieser Definition sowohl die Funktion eines Moduleingangs als auch die eines Modulausgangs.

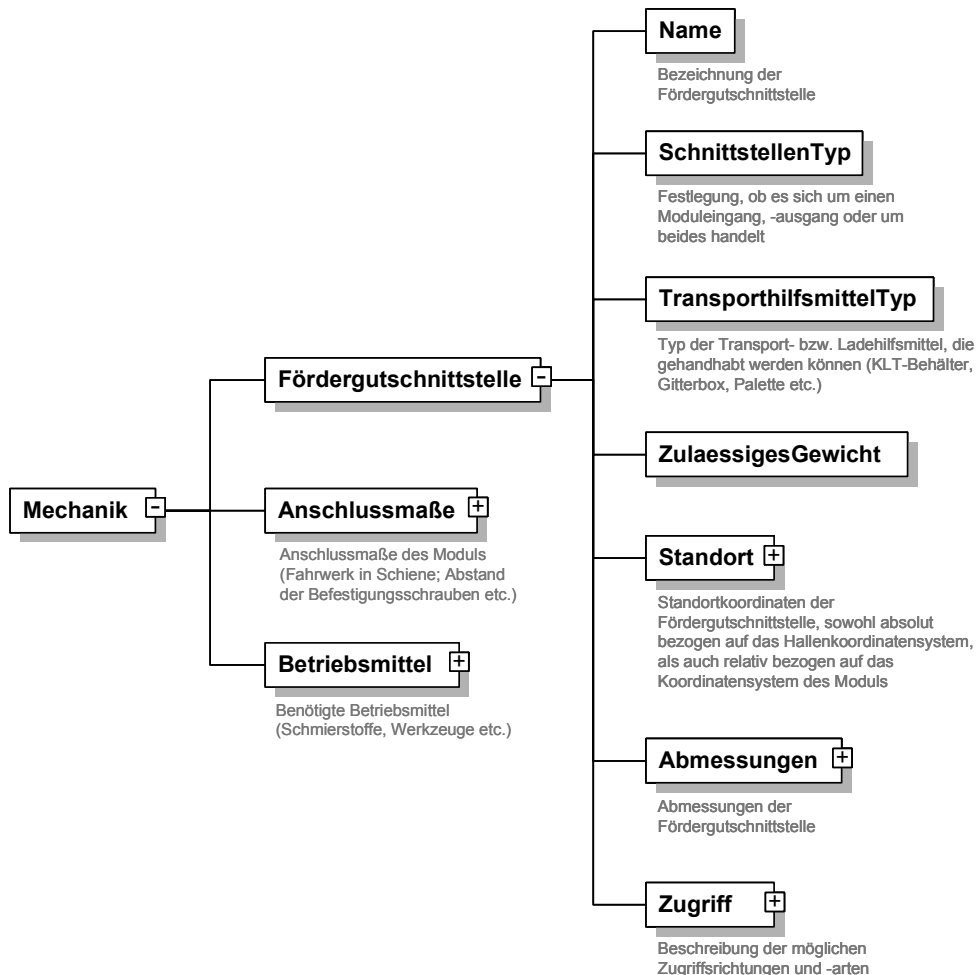


Abbildung 6-8: Mechanische Ebene der Modulschnittstelle

Mit dem Element <TransporthilfsmittelTyp> wird aufgeführt, welche Transporthilfsmittel bzw. Ladehilfsmittel von dieser Schnittstelle gehandhabt werden können. Auch dieses Element kann mehrmals vorkommen. Zulässige Fördergutgewichte werden mit dem Element <ZulaessigesGewicht> beschränkt.

Die Position der Fördergutschnittstelle legt das Element <Standort> fest. Die Koordinaten können sowohl absolut, bezogen auf ein Hallenkoordinatensystem, als auch

relativ, bezogen auf das Koordinatensystem des Moduls, angegeben werden. Die absoluten Koordinaten der Fördergutschnittstelle können erst während der Planungs- bzw. Inbetriebnahmephase des Moduls festgelegt werden, da sie davon abhängen, wo das Modul aufgestellt wird. Die relativen Koordinaten werden direkt vom Hersteller des Moduls angegeben.

Neben der Angabe, welche Lade- bzw. Transporthilfsmittel die Fördergutschnittstelle handhaben kann, lassen sich die Abmessungen dieser explizit anführen (Element <Abmessungen>).

Kann ein Übergabepplatz oder ein Lastaufnahmemittel nur aus einer bestimmten Richtung das Fördergut aufnehmen oder abgeben, z. B. von oben, wird dies in dem Element <Zugriff> über die erlaubte Zugriffsrichtung geregelt. Hier ist ebenso festgehalten, ab wann eine langsame Ein- und Ausfahrt des Lastaufnahmemittels erforderlich ist.

### **6.1.2.2 Steuerungstechnische Ebene der Modulschnittstelle**

Die Zusammenarbeit der Module erfolgt über die steuerungstechnische Schnittstelle. Möchte ein Modul A einem anderen Modul B eine Anweisung geben, z. B. bei einer Lastübergabe, trägt das Modul A diese in die Modulbeschreibung des Moduls B durch Senden einer entsprechenden Nachricht ein. Dieses reagiert darauf, indem es wiederum in seine Modulbeschreibung die entsprechende Antwort stellt (Abbildung 6-9). Welche Anweisungen ein Modul verarbeiten kann und welche Antworten möglich sind, ist in der Beschreibung des Befehlssatzes hinterlegt (Abbildung 6-11).

## 6.1 Aufbau der Modulbeschreibung am Beispiel der Funktion „Transportieren“

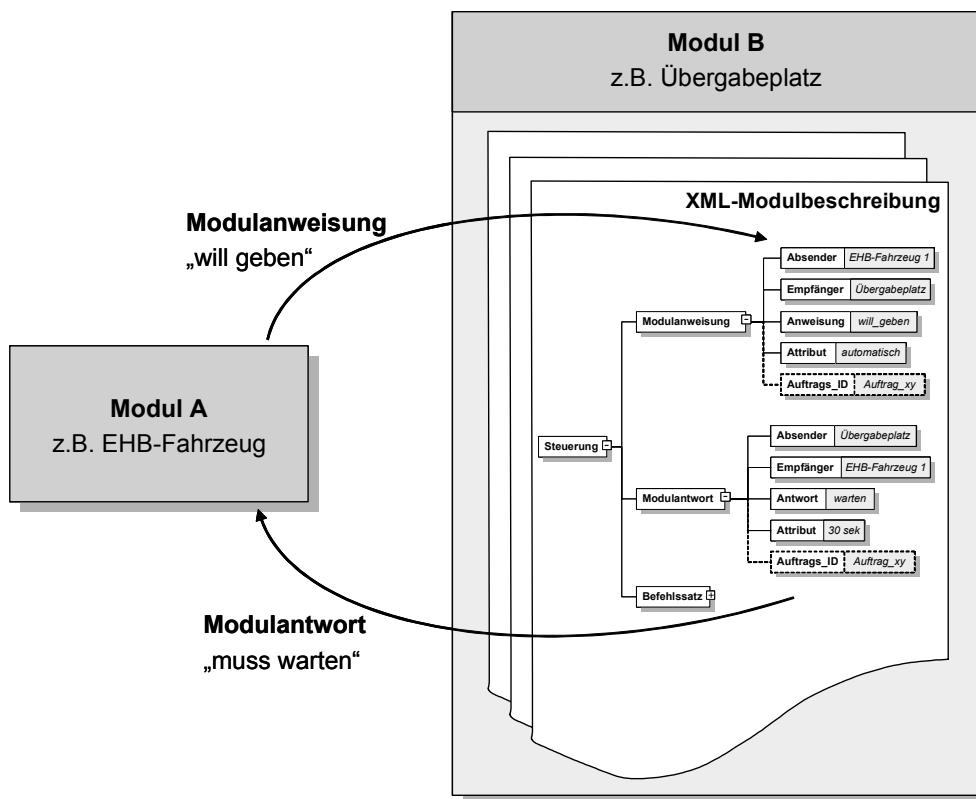


Abbildung 6-9: Kommunikation zwischen zwei Module

### **Modulanweisung**

Eine Modulanweisung besteht aus einem Absender, einem Empfänger und der Anweisung selbst, die mit Attributen versehen sein kann (Abbildung 6-10). Optional kann die Anweisung an einen Auftrag gebunden sein. Dies wird mit dem entsprechenden Auftrags-Identifizier gekennzeichnet. Der Absender ist das fremde Modul, z. B. das Fahrzeug einer Elektrohängebahn, und der Empfänger ist das Modul, zu dem die Modulbeschreibung gehört, bzw. dessen Fördergutschnittstelle. Will das Fahrzeug ein Fördergut an das Modul abgeben, weist es das Modul mit dem entsprechenden Befehl „will\_geben“ dazu an. Ein Befehl oder eine Antwort kann über Attribute genauer spezifiziert werden. In diesem Fall z. B. durch die Information, ob die Lastübergabe automatisch oder manuell erfolgen soll.

### **Modulantwort**

Die Modulantwort ist vergleichbar aufgebaut. Nur ist hier der Absender das Modul bzw. dessen Fördergutschnittstelle und der Empfänger ist derjenige, der die Anweisung gegeben hat. Die Antwort beinhaltet die Reaktion auf eine vorher gegebene Anweisung, z. B. „warten“ (Abbildung 6-10).

## 6.1 Aufbau der Modulbeschreibung am Beispiel der Funktion „Transportieren“

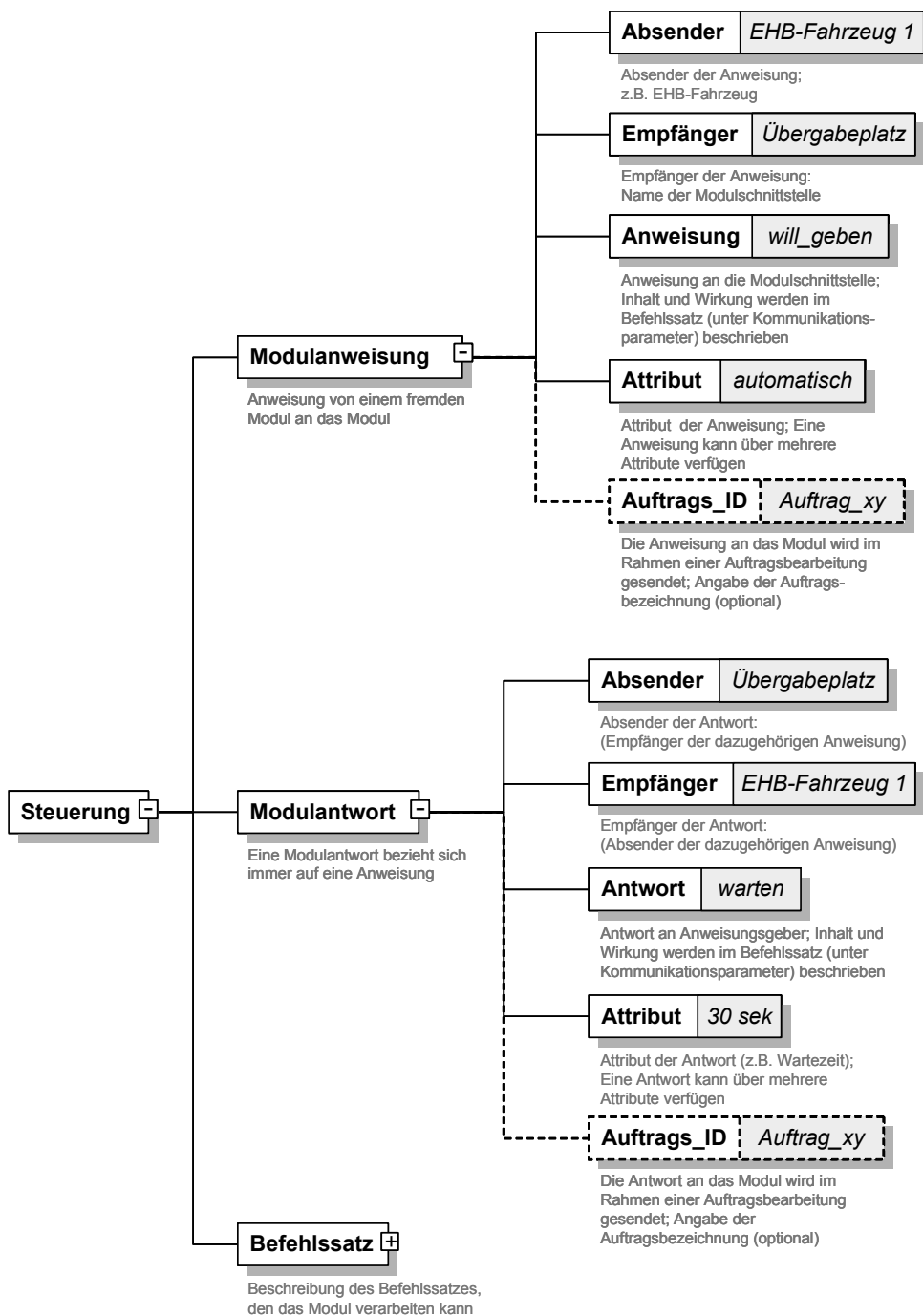


Abbildung 6-10: Steuerungstechnische Ebene der Modulschnittstelle

### Beschreibung des Befehlssatzes

Eine Definition des Befehlsatzes, also welche Anweisungen ein Modul verarbeiten kann und wie die entsprechenden Antworten aussehen, geschieht in dem Element <Befehlsatz> (Abbildung 6-11).

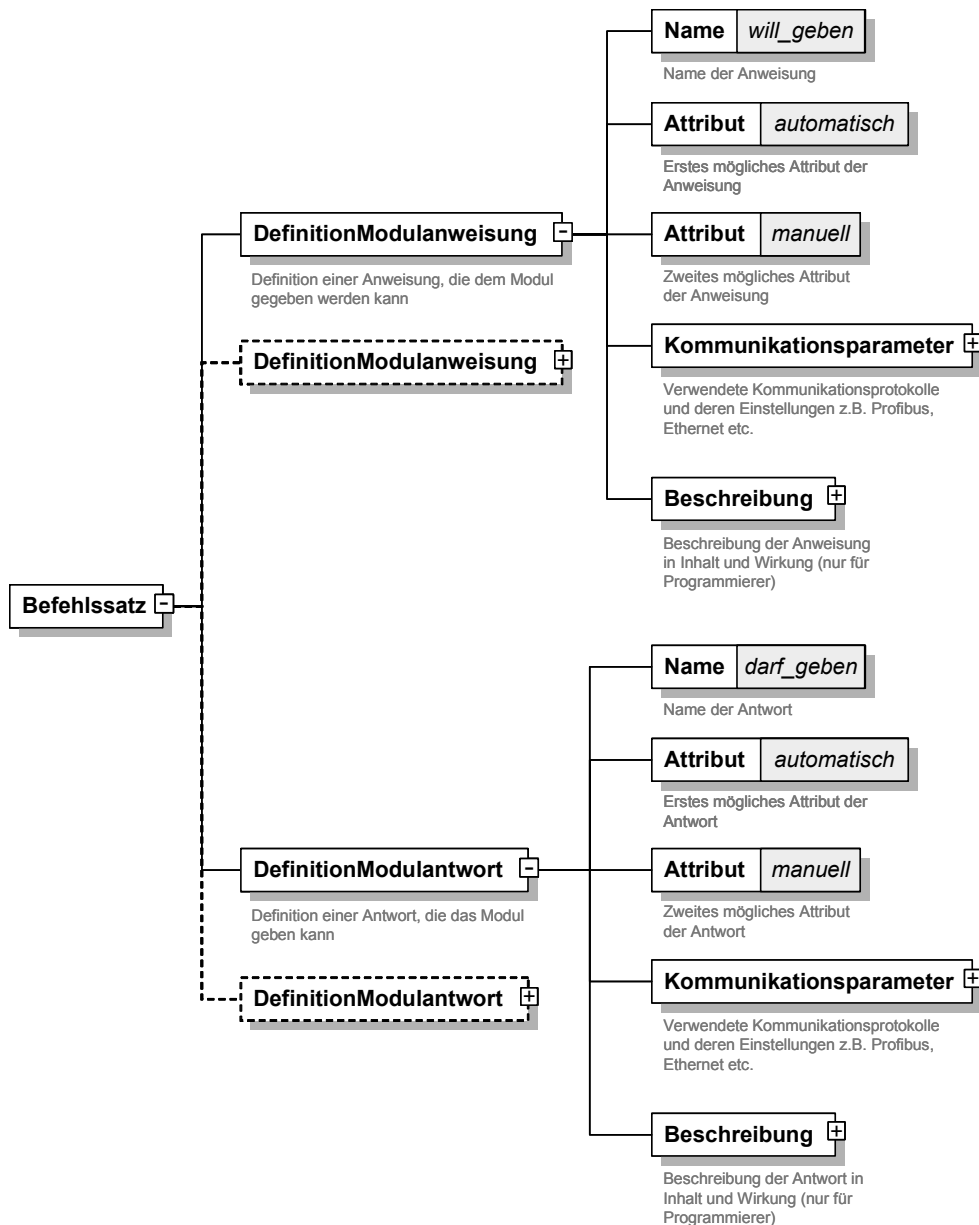


Abbildung 6-11: Definition des Befehlsatzes

Für jeden Befehl und jede Antwort existiert ein eigenes Definitions-Element. Dieses besteht aus einem Namen und Attributen. In dem Definitions-Element ist beschrieben, welche Attribute eine Anweisung haben kann.

## 6.1 Aufbau der Modulbeschreibung am Beispiel der Funktion „Transportieren“

Des Weiteren werden in dem Element <DefinitionModulanweisung> bzw. in dem Element <DefinitionModulantwort> die Kommunikationsparameter definiert. Diese legen fest, auf welche Art und Weise die Modulanweisung erfolgen kann. Das in dieser Arbeit entwickelte Konzept einer funktionsorientierten Modularisierung beinhaltet ein Kommunikations- und Schnittstellenkonzept auf Basis von XML (siehe Kap. 6.2). Dementsprechend muss das Modul jeden Befehl in Form einer XML-Anweisung verstehen können. Zusätzlich können noch weitere Kommunikationsprotokolle unterstützt werden, falls diese in den Parametern hinterlegt sind.

Abbildung 6-12 zeigt, wie die Anweisung „will\_geben“ mit alternativen Protokollen zu der XML-Variante übertragen werden kann. In diesem Beispiel kann das zum einen als CAN-Telegramm und zum anderen durch Betätigen eines elektromechanischen Tasters, der an dem Modul angebracht ist, geschehen. Das Versenden der Anweisung mittels CAN-Bus [Ets-00] könnte z. B. über ein CAN-Telegramm mit dem Identifier „3F4“ geschehen. Die Länge (<Length>) des Telegramms würde zwei Byte betragen. Dabei würde das erste Byte die Information beinhalten, dass es sich um den Befehl „will\_geben“ handelt und das zweite Byte würde festlegen, dass dieser Vorgang automatisch erfolgen soll.

Die Anweisung „will\_geben“ lässt sich nicht nur über Feldbusse übermitteln, sondern kann auch bei einem manuellen Zugriff auf das Modul durch ein einfaches Betätigen eines Tasters oder Schalters erfolgen. Der Name dieses Tasters wird in dem Element <SchalterTaster> angezeigt.

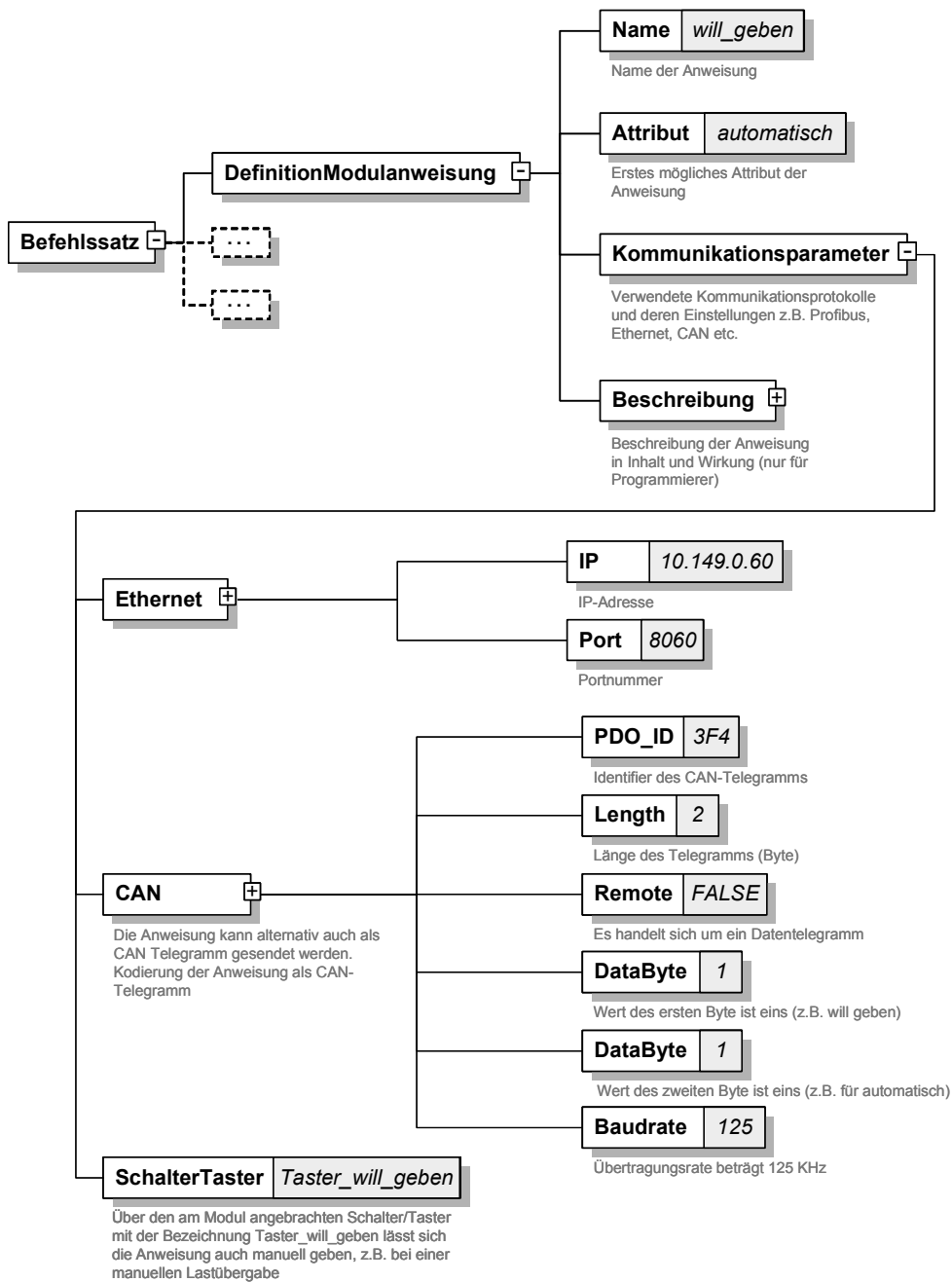


Abbildung 6-12: Alternative Kommunikationsparameter



### 6.1.2.3 Energetische Ebene der Modulschnittstelle

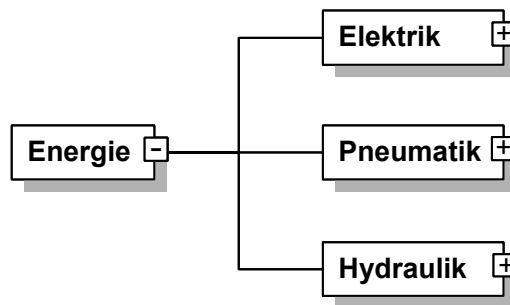


Abbildung 6-13: Energetische Ebene der Modulschnittstelle

Neben der mechanischen und steuerungstechnischen Ebene existiert noch eine dritte, energetische Ebene der Modulschnittstelle. Diese regelt die Strom-, Druckluft- oder Hydraulikversorgung des Moduls.

Am Beispiel der Materialflussfunktion „Transportieren“ wurde in diesem Kapitel eine Methodik zur standardisierten Beschreibung für die Technikmodule entwickelt. Da sich ein Subsystem, wie beschrieben aus der Kombination der Teilfunktionen und damit der Technikmodule ergibt, wird aufbauend auf die Modulbeschreibung für die Technikmodule in dem folgenden Kapitel eine Beschreibung der Subsysteme erarbeitet.

### 6.1.3 Modulbeschreibung für Subsysteme

Die Charakteristik und Eigenschaften eines Subsystems wurden in Kapitel 5.3.3.1 ausführlich beschreiben und in Tabelle 5-5 dargestellt. Subsysteme ergeben sich aus dem Zusammenspiel und der Kombination der einzelnen Technikmodule. Im Gegensatz zu Technikmodulen haben Subsysteme einen direkten Anwendungsbezug und sind abhängig vom jeweiligen Einsatzort. Alle in der Beschreibung angegebenen Koordinaten stellen absolute Werte dar.

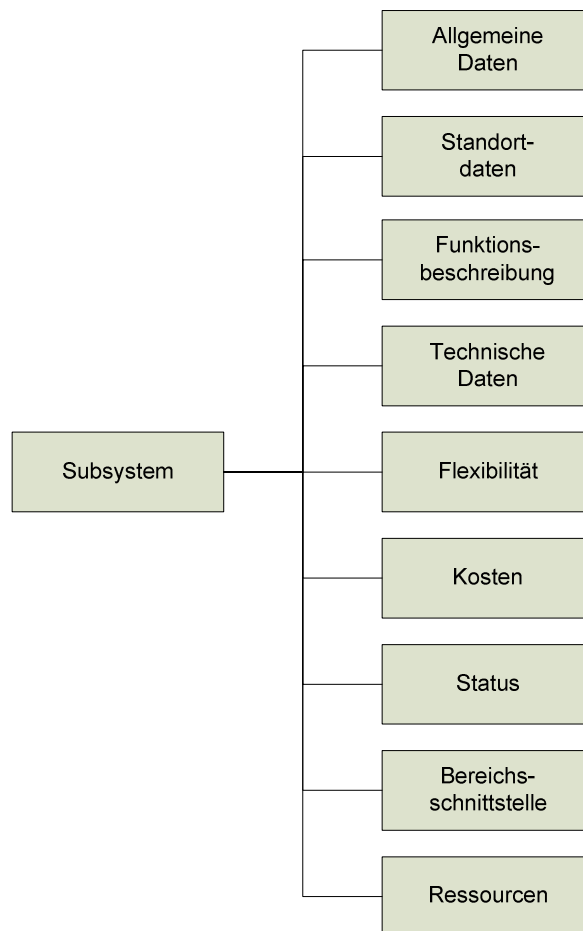


Abbildung 6-14: Datenstruktur der Beschreibung eines Subsystems

Die Struktur der Beschreibung eines Subsystems, in Abbildung 6-14 dargestellt, ähnelt der Beschreibung eines Technikmoduls. Neu hinzugekommen sind der Überpunkt „Ressourcen“, der alle zu dem Subsystem gehörigen Technikmodule beinhaltet, sowie die Angabe standortbezogener Daten („Standortdaten“).

### **Allgemeine Daten und Funktion:**

Unter der Rubrik „Allgemeine Daten“ werden Informationen über die Bezeichnung des Subsystems, den Planer und das Planungsdatum hinterlegt. Darüber hinaus wird festgehalten, in welchen Bereich bzw. Prozess der hierarchischen Struktur einer Fabrik (vgl. Abbildung 5-10) das Subsystem eingesetzt wird.

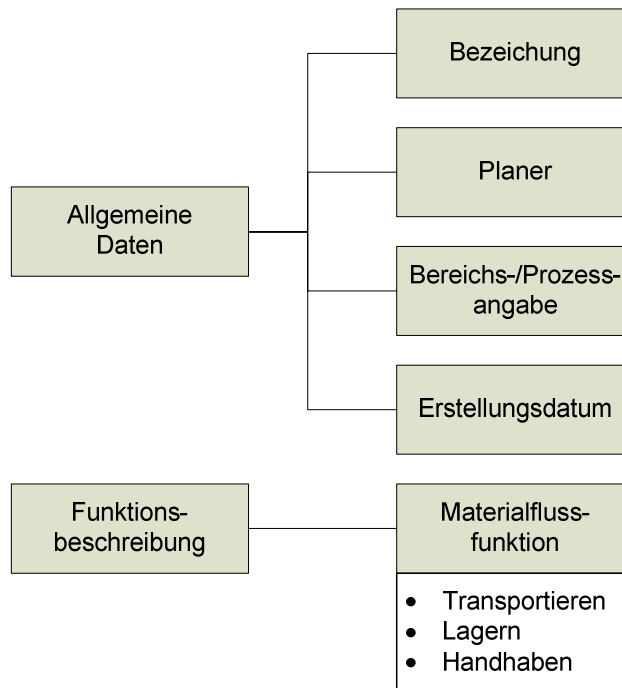


Abbildung 6-15: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Allgemeine Daten“ und „Funktion“

Unter Funktionsbeschreibung wird hinterlegt, welche der drei Materialflussfunktionen das Subsystem ausführt.

**Standortdaten:**

Unter dem Überbegriff „Standortdaten“ werden alle standortspezifischen Daten hinterlegt, die bei der Planung und dem Betrieb berücksichtigt werden müssen. Neben lokalen Daten, die den Bereich oder Prozess betreffen, werden hier auch globale, länderspezifische Daten hinterlegt. Neben gesetzlichen oder umweltrechtlichen Auflagen werden in diesem Punkt auch die länderspezifischen Kostensätze für die Arbeitskraft, die Energie und Betriebsstoffe aufgeführt. Diese werden zur Ermittlung der Kosten benötigt.

Lokale, den Prozess betreffende Daten können bautechnischer Art (Gebäude, Bodentraglast, Deckentraglast,...) sein oder die Medienversorgung (z.B. energetische Versorgung) betreffen.

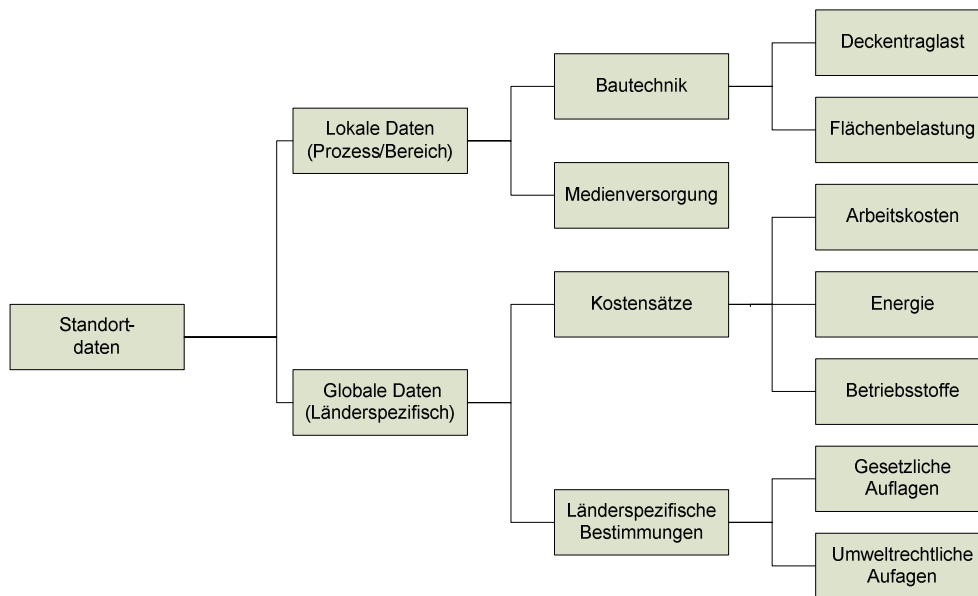


Abbildung 6-16: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Standortdaten“

### Technische Daten:

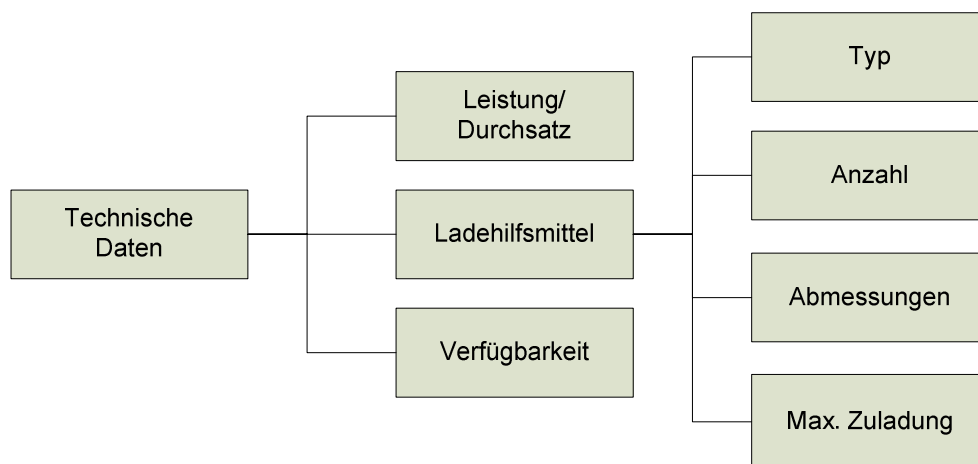


Abbildung 6-17: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Technische Daten“

Die technischen Daten beinhalten neben der Angabe der im Subsystem möglichen Leistung auch die eingesetzten Ladehilfsmittel (vgl. Abbildung 6-17). Die Bestimmung der Gesamtverfügbarkeit setzt sich aus den Einzelverfügbarkeiten der eingesetzten Technikmodule zusammen. Für die Berechnung der Gesamtverfügbarkeit

## 6.1 Aufbau der Modulbeschreibung am Beispiel der Funktion „Transportieren“

stehen nach VDI 3649 je nach Art der Kombination der Technikmodule verschiedene Rechenvorschriften zur Verfügung [VDI-3649].

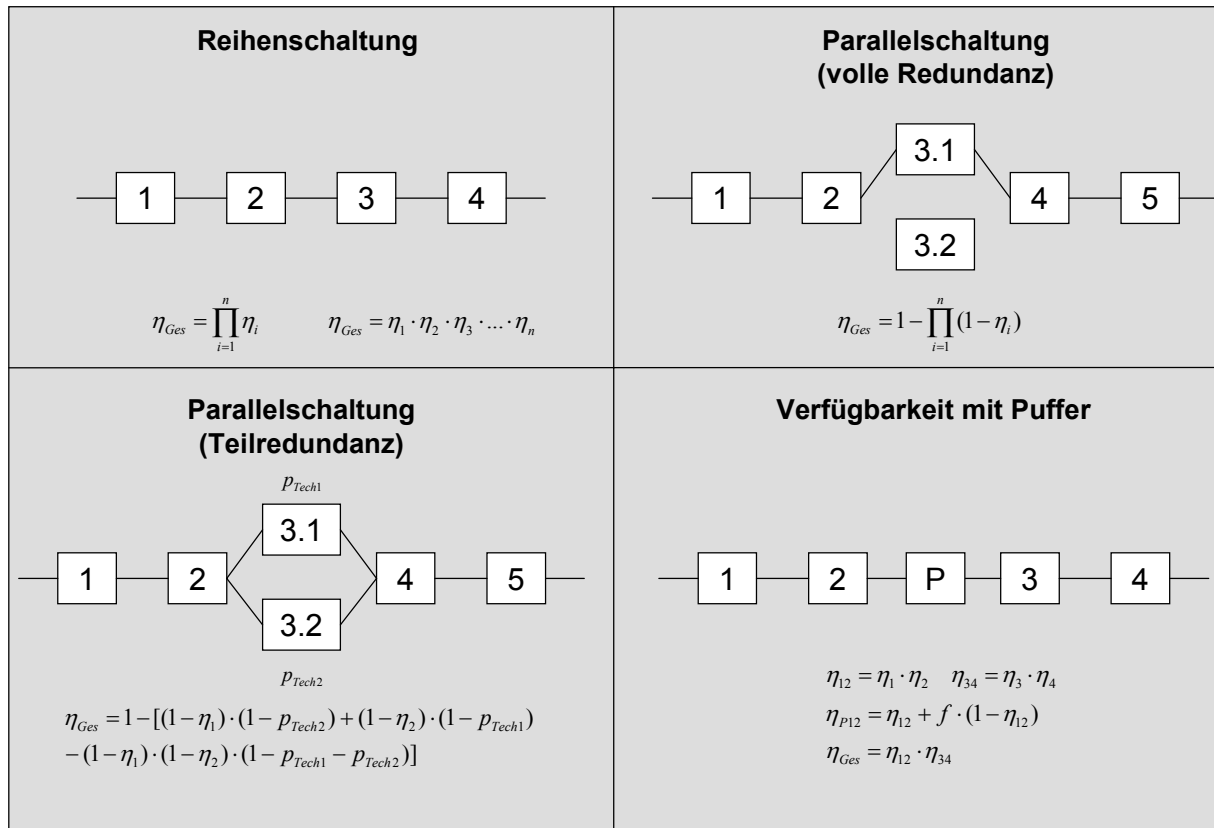


Abbildung 6-18: Berechnungsvorschriften zur Bestimmung der Gesamtverfügbarkeit

Die in Abbildung 6-18 dargestellten Berechnungsmodelle sind nur gültig, falls es sich um ein lineares System handelt, also z.B. der Behälter im System nur einen linearen Weg vom Eingang zum Ausgang durchläuft. Ringschlüsse sind nach diesen mathematischen Berechnungsvorschriften nicht möglich. Da in der Regel innerhalb eines Subsystems das Transportmittel oder das Ladehilfsmittel keine linearen Wege zurücklegt, bedarf es einer zusätzlichen Betrachtungsweise zur Berechnung der Gesamtverfügbarkeit.

Einen Lösungsansatz zur Bestimmung der Gesamtverfügbarkeit stellt das allgemeine Transportsystem dar [VDI-3581]. Die Gesamtverfügbarkeit berechnet sich nach folgender Formel:

$$\eta_{Ges} = \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i \cdot p_i$$

Erläuterungen:

$\eta_{Ges}$ : Gesamtverfügbarkeit des Subsystems

$\eta_i$ : Teilverfügbarkeit eines möglichen Weges durch das Subsystem

$p_i$ : Wahrscheinlichkeit für diesen Weg

Die Gesamtverfügbarkeit ergibt sich aus der Summe der Teilverfügbarkeiten aller durch das Subsystem möglichen Wege multipliziert mit deren Wahrscheinlichkeit. Die Vorgehensweise bei der Berechnung der Verfügbarkeit komplexer Systeme ist in Abbildung 6-19 dargestellt. Bei Berechnung der Teilverfügbarkeiten der linearisierten Elemente können die Gleichungen aus Abbildung 6-18 angewendet werden. Die Wahrscheinlichkeiten aller durchgeführten Wege sind unter dem Überpunkt „Status“ dokumentiert.

1. Linearisierung des Gesamtsystems
2. Berechnung der Verfügbarkeit  $\eta_i$  der linearisierten Teilsysteme auf Grundlage der VDI 3649
3. Berechnung der Funktionshäufigkeiten  $p_i$
4. Berechnung der Gesamtverfügbarkeit  $\eta_{ges}$  nach VDI 3581

Beispiel:

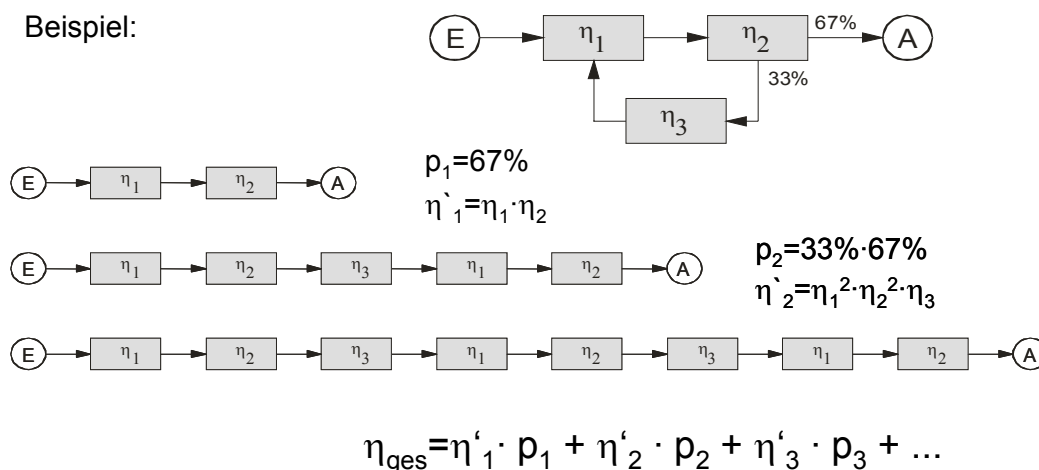


Abbildung 6-19: Vorgehensweise bei der Bestimmung der Verfügbarkeit komplexer Systeme

**Flexibilität:**

Der Überpunkt „Flexibilität“ beinhaltet die Ausprägungsarten der drei Flexibilitätskriterien, nach denen das betrachtete Subsystem ausgewählt wird. Das Flexibilitätspotenzial ergibt sich aus der Synthese der Potenziale der einzelnen Technikmodule. Zusätzlich wird neben den drei Flexibilitätskriterien das in Kapitel 4.3.4 eingeführte Wandelbarkeitspotenzial des Subsystems angegeben. Die Datenstruktur der Flexibilitätsbeschreibung ist in Abbildung 6-20 dargestellt.

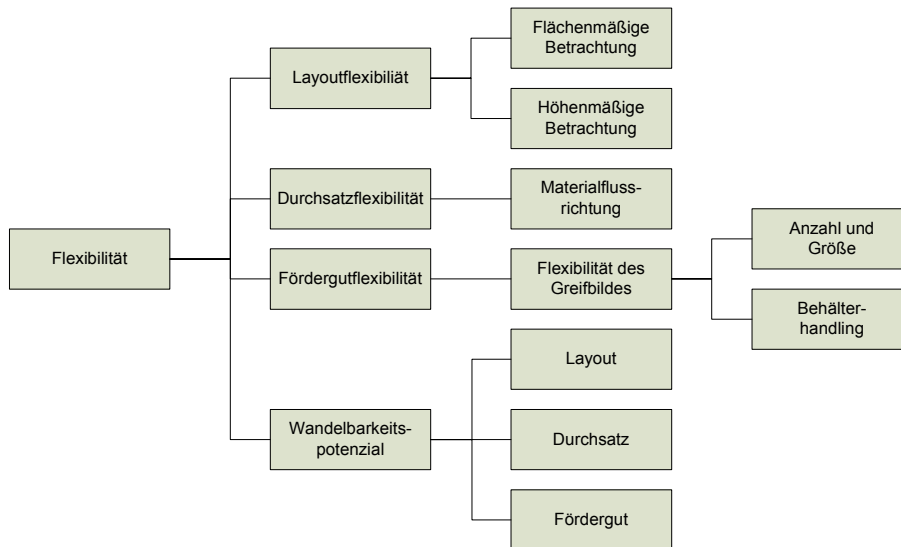


Abbildung 6-20: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Flexibilität“

**Kosten:**

Die Investitionskosten ergeben sich aus der Summe der Einzelkosten für die in dem Subsystem eingesetzten Technikmodule. Die Energie- und die Betriebsstoffkosten ergeben sich aus den jeweiligen Verbrauch der einzelnen Technikmodule multipliziert mit den in dem Überpunkt „Standortdaten“ hinterlegten Kostensätzen für Energie und Betriebsstoffe. Kosten für Wartung und Inbetriebnahme ergeben sich aus der in den jeweiligen Technikmodulen vorgenommenen Aufwandsabschätzungen und den Stundensätzen aus den länderspezifischen Daten. Die Datenstruktur mit Angabe der einzelnen Kostenarten ist in Abbildung 6-21 dargestellt.

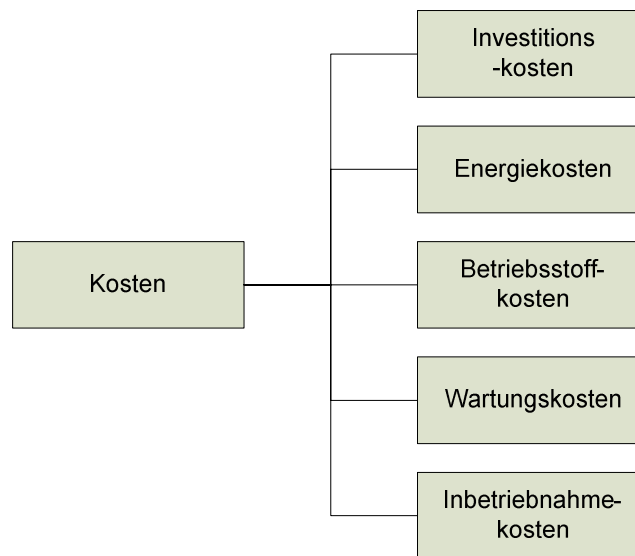


Abbildung 6-21: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Kosten“

### **Status:**

Analog zu der Beschreibung eines Technikmoduls soll unter dem Überpunkt „Status“ der aktuelle Zustand des Subsystems abgefragt werden. Die Datenstruktur des Überpunktes „Status“ ist in Abbildung 6-22 dargestellt. Neben der Betriebsart (Initialisierung, Fehler-, Notausssituation, Bereit) werden dort Information über den jeweiligen Planungs- (Grobplanung, Feinplanung, Aufbauphase, Inbetriebnahme, Abbauphase) und Betriebszustand (Manuell, Automatik) des Subsystems abgelegt. Darüber hinaus werden unter Status alle das Technikmodul betreffenden Zustände dokumentiert. Neben der Auflistung aller Inbetriebnahmen und Planungen werden hier insbesondere die Wartungen und Störungen berücksichtigt. Unter dem Element <Wegdaten> werden alle Bewegungen innerhalb des Subsystems dokumentiert, die für die Berechnung der Gesamtverfügbarkeit notwendig sind.



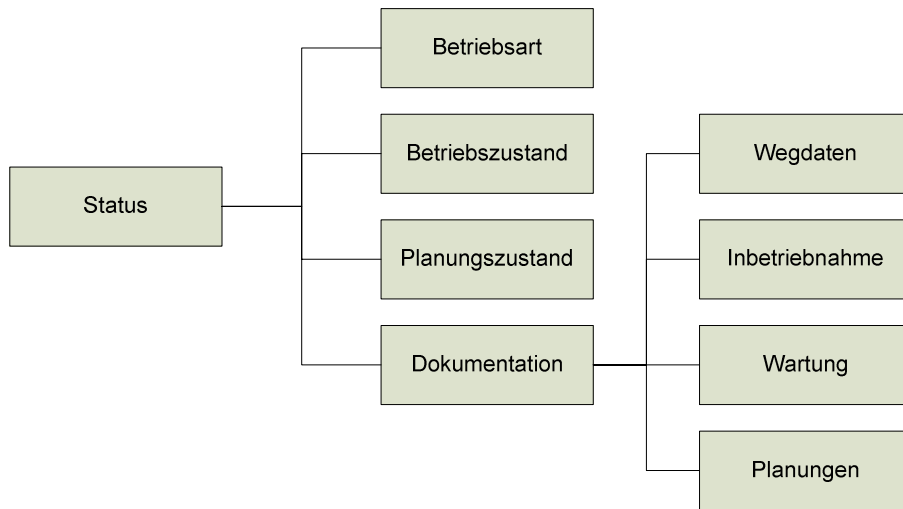


Abbildung 6-22: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Status“

### **Bereichsschnittstelle:**

Nach dem in Kapitel 5.3 vorgestellten funktionsorientierten Modularisierungsansatz werden die gesamten innerhalb einer Fabrikstruktur vorliegenden Abläufe hierarchisch in einzelne Bereiche bzw. Prozesse gegliedert. Für diesen Bereich werden anschließend geeignete Subsysteme ausgewählt. Da auch zwischen den Bereichen und den Subsystemen innerhalb eines Bereiches ein Austausch von Gütern möglich sein muss, besteht zwischen den einzelnen Bereichen in der Regel eine Schnittstelle. Über diese Schnittstelle kann entweder eine Übergabe der Ladehilfsmittel erfolgen oder das Transportmittel kann direkt in den anderen Bereich gelangen.

Unter dem Überpunkt „Bereichsschnittstelle“ sind alle Informationen hinterlegt, die den Übergang zwischen den verschiedenen Bereichen oder auch zwischen den Subsystemen innerhalb eines Bereiches regeln. Analog zu der Beschreibung der Modulschnittstelle gliedert sich die Schnittstelle eines Technikmoduls in eine mechanische, energetische und steuerungstechnische Ebene (vgl. Abbildung 6-23). Die Zusammenarbeit der einzelnen Bereiche erfolgt über die steuerungstechnische Ebene. Hier ist der Austausch von Informationen und Steuerungsbefehlen zwischen den einzelnen Bereichen und Subsystemen geregelt. Die energetische Schnittstelle regelt den Austausch von Strom, Druckluft oder Hydrauliköl. Eine genaue Definition der beiden Schnittstellenarten soll nicht Bestandteil dieser Arbeit sein.

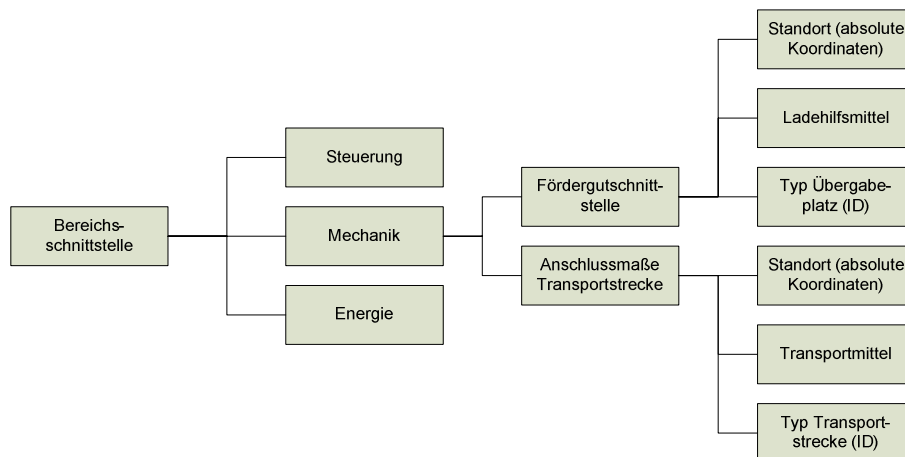


Abbildung 6-23: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Bereichsschnittstelle“

Besondere Bedeutung kommt der Beschreibung der mechanischen Komponente der Bereichsschnittstelle zu. Diese charakterisiert die Koppelung zwischen einzelnen Bereichen und Subsystemen untereinander. Eine Verbindung kann dabei auf zweierlei Weise erfolgen. Entweder wird ein fester Übergabepunkt in Form eines Technikmoduls „Übergabepplatz“ definiert, oder die Koppelung erfolgt über das Technikmodul „Transportstrecke“, so dass der Austausch von Transportmitteln möglich ist. In beiden Fällen müssen bei der Beschreibung die absoluten Koordinaten und der Typ des Technikmoduls festgelegt werden. Falls der Austausch über eine Fördergutschnittstelle erfolgt, wird zusätzlich noch das zu übertragende Ladehilfsmittel angegeben. Im Falle der Koppelung über das Technikmodul Transportstrecke wird die Beschreibung des Subsystems durch die Angabe des Transportmittels ergänzt.

### Ressourcen:

Die Beschreibung des Überpunktes „Ressourcen“ beinhaltet alle Technikmodule, die unter dem betrachteten Subsystem zusammengefasst sind. Neben der Angabe der Anzahl der eingesetzten Transportmittel wird unter diesem Punkt die Topologie der Transportstrecke mit den verschiedenen Übergabepunkten festgelegt. Mit Hilfe der absoluten Koordinaten zur Beschreibung der Standorte für die Technikmodule „Übergabepplätze“ und „Transportstrecke“ mit den entsprechenden Vorgänger- und Nachfolgermodulen kann die Steuerung alle notwendigen Informationen entnehmen, um alle möglichen Wege durch das Subsystem abzubilden.

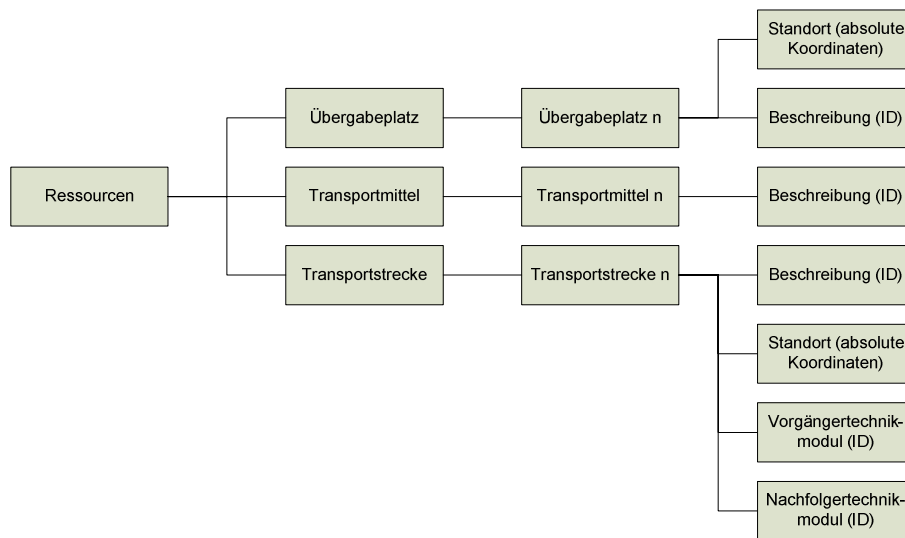


Abbildung 6-24: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Ressourcen“

## 6.2 Datensprache der Modulbeschreibung

### 6.2.1.1 Datenkodierung: XML

Für eine flexible, firmenunabhängige Kommunikation für ein wandelbares Materialflusssystem ist neben einer systemunabhängigen technischen Übertragung von Daten (Ethernet) die Gestaltung der Anwendungsschicht (Schicht 7, ISO/OSI-Referenzmodell [Tan-97]) von entscheidender Bedeutung.

Übliche Datenübertragungsmechanismen wie bei klassischen Feldbusprotokollen (PROFIBUS, CAN) oder einem einfachen Datenaustausch in Form eines ASCII-Formates bedingen, dass Empfänger und Sender über einen gemeinsamen Kodierungsschlüssel verfügen. Dabei werden grundsätzlich Informationen in Form von Zahlenwerten bzw. Bit-Kombinationen übertragen. Die einzelnen Daten sind durch Trennzeichen oder die Verteilung auf verschiedene Telegramme voneinander getrennt. In dem gemeinsamen Kodierungsschlüssel ist festgelegt, in welcher Reihenfolge und wie die Daten zu verstehen sind. Eine gewisse Erweiterungsfähigkeit wird erreicht, indem Freiräume in der Datenübermittlung vorher festgelegt werden. Allerdings ist man darauf angewiesen, dass diese Freiräume ausreichend dimensioniert

und an den logisch richtigen Stellen sind, um nicht die anfänglich definierte logische Grundstruktur der Daten zu verlieren.

Ein Datenaustausch auf Basis von CAN, PROFIBUS etc. ist in seiner Integrationsfähigkeit (gemeinsamer, bekannter Kodierungsschlüssel) und in seiner Erweiterungsfähigkeit (Freiräume müssen in der Datenstruktur vordefiniert sein) eingeschränkt.

Einen weit besseren Lösungsansatz für einen offenen und erweiterungsfähigen Datenaustausch bietet die Datensprache XML (Extensible Markup Language) [W3C-04].

XML ist eine Metasprache, die die Regeln für die Erstellung von Dateistrukturen auf Basis von Textformaten beschreibt. So kann man mit XML die logische Bedeutung von Daten, Informationen und Texten definieren. Neben der eigentlichen Information werden gleichzeitig auch die Datenbezeichnung und das Datenformat übermittelt.

Um einzelne Informationen voneinander zu trennen und zu kennzeichnen, verwendet man so genannte Markups (daher auch der Name Markup Language; Auszeichnungssprache). Ein einfaches Beispiel hierfür ist die Funktion des Leerzeichens, mit dem Wörter voneinander getrennt werden.

Markups werden z. B. auch dafür eingesetzt, um bei einem Datenaustausch von Adressen zwischen zwei Datenbanken zu definieren, bei welcher Information es sich beispielsweise um einen Vornamen oder eine Hausnummer handelt. In XML werden diese Markups als Tags bezeichnet.

Ein XML-Dokument besteht aus Elementen und Elementinhalten. Ein Element beginnt mit einem Starttag und schließt mit einem Endtag ab. Das Starttag besteht aus dem Elementnamen, der in spitzen Klammern eingefasst ist (<adresse>). Darauf folgt der Elementinhalt und abschließend das Endtag, das auch in spitzen Klammern, allerdings zusätzlich mit einem Schrägstrich, den Elementnamen wiederholt (</adresse>). Ein Element kann auch als Inhalt weitere Elemente besitzen.

Folgendes Beispiel zeigt, wie einer Adresse Tags zugeordnet werden, um sie in XML darzustellen. Das Element <adresse> verfügt dabei über mehrere Unterelemente (Vorname, Nachname etc.).

### Beispiel:

Michael Mustermann  
Musterweg 11  
80999 München

### Beispiel in XML:

```
<adresse>  
  <vorname>Michael</vorname>  
  <nachname>Mustermann</nachname>  
  <strasse>Musterweg</strasse>  
  <hausnummer>11</hausnummer>  
  <plz>80999</plz>  
  <ort>München</ort>  
</adresse>
```

Alternativ erlaubt XML die Benutzung von Attributen, die mit den Eigenschaften eines Elementes versehen werden. Die Werte der Attribute werden mit Hochkommata eingeschlossen.

### Beispiel in XML mit Attributen:

```
<adresse  
  vorname="Michael"  
  nachname="Mustermann"  
  strasse="Musterweg"  
  hausnummer="11"  
  plz="80999"  
  ort="München"  
>
```

Hat ein Element keinen Inhalt, kann auf das Endtag verzichtet werden, wenn als letztes Zeichen vor der schließenden spitzen Klammer ein Schrägstrich geschrieben wird (<adresse />).

Die Typdefinition eines solchen Elementes wird in einer so genannten DTD (Document Type Definition) hinterlegt. Eine Alternative dazu ist die Definition mit Hilfe eines XML-Schemas. Dieses entspricht anders als die DTD den XML-Syntaxregeln und kann weit reichende Vorgaben für Dokumente enthalten. Außer den Namen und Datentypen kann zum Beispiel auch festgelegt werden, wie oft ein bestimmtes XML-Element in dem so definierten Dokument auftauchen darf. Zusätzlich können dem XML-Dokument auch Style-Sheets zugeordnet werden, um bestimmte Elemente des Dokumentes graphisch hervorzuheben (z. B. größere Schriftart und Farbe bei der PLZ und der Ortsangabe). Die W3C bietet eine Definition von Standarddatentypen und –schemata an. Die Zuordnung, welche DTDs bzw. Schemata von dem XML-Dokument verwendet werden, wird im Kopf des Dokumentes angegeben [W3C-04].

### **Vorteile von XML**

Ein XML-Dokument lässt sich von unterschiedlichsten Anwendungen nach Daten durchforsten. Benötigt zum Beispiel die Lagerverwaltungssoftware die Maße und das Gewicht eines bestimmten Artikels, der eingelagert werden soll, kann diese die entsprechenden Informationen in der CAD-Datei ohne großen Aufwand direkt nachschlagen, wenn sie dort in XML-kodiert abgelegt sind. Die Software muss auf diese Weise weder mit Funktionen zur Interpretation von CAD-Zeichnungen ausgestattet sein, noch müssen die Informationen vorher in gesonderte Dateien übertragen werden.

- Mit XML kann man die logische Bedeutung von Daten, Informationen und Texten definieren.
- XML ist erweiterbar (extensible Markup)
- Plattformunabhängig
- XML basiert auf der Textform; Förderung der Transparenz und Portabilität (Einfache Darstellungsmöglichkeit über Web-Browser)
- XML trennt die Struktur eines Dokuments von ihrem Inhalt;
- Daten können in Umfang und Struktur variieren; sie müssen nicht in vordefinierte Tabellen eingefügt werden.

### Nachteile von XML

Die Vorteile von XML sind aber auch mit Nachteilen verbunden. Zum einen nimmt das Datenvolumen deutlich zu. Dies muss durch entsprechend leistungsfähige Kommunikationssysteme ausgeglichen werden. Zum anderen hilft es zunächst wenig, wenn ein Absender seine Daten zwar mit den dazugehörigen Bezeichnungen versieht, aber dabei nicht wie erwartet die Auftragsnummer mit dem Tag <Auftragsnummer> bezeichnet, sondern vielleicht mit <Order-ID> markiert. Dieses Problem lässt sich vermeiden, wenn Absender und Empfänger sich auf das gleiche XML-Schema geeinigt haben. In diesem können zusätzlich auch alternative Bezeichnungen/Übersetzungen für ein Element hinterlegt sein. Welches XML-Schema verwendet wird, ist am Anfang eines XML-Dokumentes definiert.

#### 6.2.1.2 Verarbeitung von XML-Dokumenten

Das Be- und Verarbeiten von XML-Dokumenten geschieht mit Hilfe eines Parsers. Ein XML-Parser ist eine Software, die ein XML-Dokument einliest und Struktur und Eigenschaften der enthaltenen Daten bestimmt. Der Parser bricht die Daten in Teile auf und gibt die Informationen an andere Softwarekomponenten weiter. XML-Parser lassen sich nach zwei Kriterien unterscheiden:

- Validierend oder nicht validierend
- Schnittstelle zum Zugriff auf das XML-Dokument (SAX oder DOM).

Ein nicht validierender Parser überprüft nur, ob das XML-Dokument der XML-Spezifikation folgt, also wohlgeformt ist. Die Wohlgeformtheit (oder Zulässigkeit) eines XML-Dokumentes hängt von dem Aufbau bzw. dem korrekten Umgang mit den Elementen unabhängig von deren Inhalten ab. Bei diesem Parser-Typ ist weder eine DTD noch ein Schema nötig.

Ein validierender Parser überprüft das XML-Dokument auf die Einhaltung der in einer DTD oder in einem XML-Schema definierten Regeln. So kontrolliert er z. B. auf die Existenz oder das Nichtvorkommen bestimmter Elemente sowie auf die korrekte Verschachtelung der Elemente. Außerdem wird auch die Wohlgeformtheit des Dokuments getestet.

Des Weiteren unterscheidet man Parser danach, wie sie XML-Dokumente verarbeiten. Ein SAX-Parser (Simple API for XML) arbeitet ereignisgesteuert. Dazu liest er das XML-Dokument von vorne nach hinten durch und löst Ereignisse aus, wenn er z. B. ein XML-Element korrekt erkannt oder Fehler bemerkt hat. Diese Ereignisse können dann von einer nachgelagerten Applikation verarbeitet werden.

Beim Lesen des nachstehenden Beispiels würde dieser Parser folgende Ereignisse auslösen:

```
<nachname>Mustermann</nachname>
```

- Identifizierung eines Starttags: <nachname>
- Inhalt des Elementes: Mustermann
- Identifizierung des Endtags: </nachname>

Ein DOM-Parser (Document Object Model) ist ein Standard des World Wide Web Consortium (W3C). Dieser baut beim Parsen des XML-Dokuments einen Baum auf, den DOM-Tree. Das Root-Element des XML-Dokuments fungiert als Wurzel für den DOM-Tree (vgl. Abbildung 6-25). Dieser Baum steht dann im Speicher zur Verfügung. Er ist quasi das Abbild des XML-Dokuments.

```
<buch>
  <Titel>Die Physiker</Titel>
  <Autor>
    <Vorname>Friedrich</Vorname>
    <Nachname>Dürrenmatt</Nachname>
  </Autor>
</buch>
```



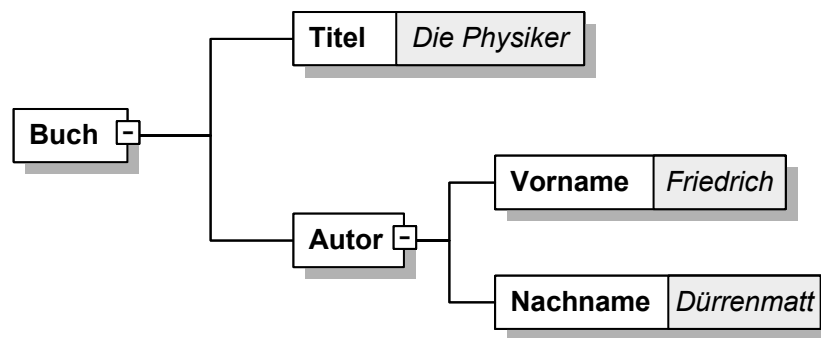


Abbildung 6-25: DOM-Tree eines XML-Dokuments

DOM und SAX bieten auf Grund ihres unterschiedlichen Verhaltens verschiedene Vorteile an. SAX geht die einzelnen Elemente und damit das ganze Dokument zügig durch. Stellt SAX allerdings am Ende eines langen XML-Dokumentes einen Fehler fest, ist es meist schwierig, die bis dahin geschehenen Aktionen wieder rückgängig zu machen. Ebenso steht keine Datenstruktur zur Verfügung, auf die nach dem Parsen zugegriffen werden kann. Somit ist SAX ideal für alle Anwendungen, die das XML-Dokument nur einmal "durchlesen" sollen, beispielsweise um es anzuzeigen.

DOM hingegen ist bedeutend langsamer und speicherintensiver, da erst die Baumstruktur aufgebaut werden muss. Es bietet aber die Möglichkeit der einfachen Manipulation des DOM-Trees (also des XML-Dokuments).

Die Wahl, welcher Parser in der Modulsteuerung eingesetzt wird, kann der Hersteller des Moduls selber treffen. Sie hängt stark von der verwendeten Hardware ab. Übernehmen SPSen die Steuerung, ist aus den oben genannten Gründen (schneller; geringerer Speicherbedarf) eher ein SAX-Parser zu empfehlen.

### 6.2.1.3 Anwendungsbeispiel

Eine in der Datensprache XML ausgeführte Modulbeschreibung des Technikmoduls „Übergabeplatz“ ist in Abbildung 6-26 dargestellt.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<!-- edited with XMLSPY v5 U (http://www.xmlspy.com) by Markus Heinecker (TU Muenchen)
- <SOAP:Envelope xmlns:SOAP="http://www.w3.org/2001/SOAPSchema" xmlns:xsi="http://www.w
- <SOAP:Body>
  - <Modulbeschreibung>
    - <Allgemeine_Daten>
      <Modulname>Übergabe MoMa</Modulname>
      <Bezeichnung_ID>KLT-Übergabeplatz</Bezeichnung_ID>
      <Hersteller>MoMa 3000</Hersteller>
      <Informationen />
      <Kurzbeschreibung />
    </Allgemeine_Daten>
    + <Funktionsbeschreibung>
    + <Technische_Daten>
    - <Flexibilität>
      <Layoutflexibilität />
      <Durchsatzflexibilität />
      <Fördergutflexibilität />
    </Flexibilität>
    - <Kosten>
      <Investitionskosten />
      <Energieverbrauch />
      <Verbrauchsangabe_Betriebsstoffe />
      <Wartungsaufwand />
      <Inbetriebnahmeaufwand />
    </Kosten>
    + <Status>
    - <Modulschnittstelle>
      + <Mechanik>
      + <Information>
      + <Energie>
    </Modulschnittstelle>
    </Modulbeschreibung>
  </SOAP:Body>
</SOAP:Envelope>
```

Abbildung 6-26: Ausführung einer Modulbeschreibung am Beispiel „Übergabeplatz“ unter Verwendung der Datensprache XML

## 6.3 Zusammenfassung

Aufbauend auf die entwickelte Modularisierungsmethodik für wandelbare Materialflusssysteme war es Inhalt dieses Kapitels, die geschaffenen modularisierten Bausteine für die Planung und den Betrieb von Materialflusssystemen nutzbar zu machen. Vor diesem Hintergrund wurde eine Methodik zur standardisierten Beschreibung der Technikmodule und Subsysteme erarbeitet. Die Modulbeschreibung muss

so aufgebaut werden, dass sowohl der Planer für die Planungsphase als auch die Steuerung im laufenden Betrieb die notwendigen Informationen entnehmen kann.

Technikmodule erfüllen genau eine Teilfunktion innerhalb der betrachteten Materialflussfunktionen. Die standardisierte Beschreibung wurde so gewählt, dass nur das Modul betreffende Daten hinterlegt werden und diese unabhängig von Einsatzort und Anwendungsfall sind. Vor- und nachgeschaltete Module beeinflussen nicht die Eigenschaften des betrachteten Technikmoduls.

Bei der Beschreibung der Subsysteme werden als wichtigster Bestandteil alle Technikmodule aufgeführt, aus denen sich das Subsystem aufbaut. Mit Angabe der absoluten Koordinaten bei den Übergabeplätzen und den eingesetzten Transportstrecken wird die Topologie des Subsystems festgelegt. Darüber hinaus werden bei der Beschreibung des Subsystems die Schnittstellen zu angrenzenden Bereichen und zwischen Subsystemen untereinander festgelegt. Im Gegensatz zu den Technikmodulen wird bei Subsystemen ein Standort- und Anwendungsbezug hinterlegt. Diese spielen vor allem bei der Bestimmung der Kosten, insbesondere Energie- und Wartungskosten, eine Rolle.

Aufbauend auf die Standardisierung der Modulbeschreibung, die alle wesentlichen Daten für die Planung und Steuerung enthält, wurde anschließend eine Datensprache ausgewählt, die sowohl der Planer als auch die Steuerung lesen kann. Mit Hilfe der Datensprache XML, die diese Anforderungen erfüllt, ist es möglich, die Informationen in der Technikmodul- und Subsystembeschreibung so zu kodieren, dass zum einen eine hierarchische Struktur mit Überpunkten und Elementen zur Verfügung steht, was der Übersichtlichkeit und Datentransparenz dient. Auf der einen Seite stellen die Modulbeschreibungen dem Planer die Informationen zur Verfügung, geeignete Technikmodule für die Gestaltung des Materialflusssystems auszuwählen. Auf der anderen Seite können sich die Steuerungen der anderen Technikmodule aus der Modulbeschreibung die Informationen holen, wie sie mit anderen Modulen in Form von Modulanweisungen und Modulantworten kommunizieren können.



# 7 Anwendungsbeispiele

## 7.1 Kundenindividuelle Produktion von Konsumgütern

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 beschriebene Kriterien für die Bewertung der Flexibilität und der entwickelten Gestaltungsmethodik aus Kapitel 5 wurde ein Referenzszenario für ein Materialflusssystem entworfen, das für den Einsatz in einer kundenindividuellen Produktion von Konsumgütern am Beispiel eines Hochdruckreinigers gestaltet wurde.

Die kundenindividuellen Produkte zeichnen sich dadurch aus, dass der Kunde direkt Einfluss auf die Gestaltung und den Funktion- sowie Leistungsumfang seines Produktes hat. Die Gestaltung kann vom beliebigen Zusammensetzen einzelner Module bis hin zur völlig individuellen Neukreation gehen. Für die Produktion selber bedeuten diese Freiheitsgrade, dass in einer Fabrik neben auftragsneutralen Bauteile und Module vor allem auch individuelle Teile gefertigt werden müssen. Die kundenindividuellen Teile können nicht vorproduziert und auf Lager gehalten werden, da sie erst nach Erfassung des Kundenwunsches hergestellt werden können. Dies erfordert eine enge Abstimmung mit dem Kunden. Die Herstellung der individuellen Teile erfolgt vor Ort unter anderem mit den neuen Fertigungsverfahren, wie beispielsweise das rechnergesteuerte Treiben von Blechteilen oder Rapid Manufacturing von Kunststoffteilen mit tropfenbasierten Verfahren entsprechend den hohen Qualitätsanforderungen der Massenproduktion. Auftragsneutrale Bauteile werden in auftragsneutralen Produktionsbereichen nach konventionellen Verfahren und Strategien hergestellt oder zugekauft.

Die Fabrik gliedert sich aus diesem Grund in drei große verschiedene Bereiche - Fertigung auftragsneutraler Module, Fertigung individueller Bauteile und der Montage - für die unterschiedliche Anforderungen definiert wurden. Bei den Bereichen, in den kundenindividuelle Teile gefertigt werden ist es vor allem wichtig, dass jeder Ort bedient werden kann und keine feste Reihenfolge in der Abwicklung der einzelnen Produktionsschritte vorliegt. In den Bereichen der auftragsneutralen Fertigung ist eine Reihenfolge in der Auftragsabwicklung vorgegeben, die für alle Produkte gültig ist. In der Montage, in der die auftragsneutralen und individuellen Bauteile und -gruppen zusammengeführt werden, ist ebenfalls von geführten und getakteten Pro-

zessen auszugehen, so dass eine Getaktete Montagelinie eingesetzt wird.. Allerdings soll in den letztgenannten Bereich eine flexible Versorgung der Montagearbeitsplätze entlang der Montagelinie möglich sein.

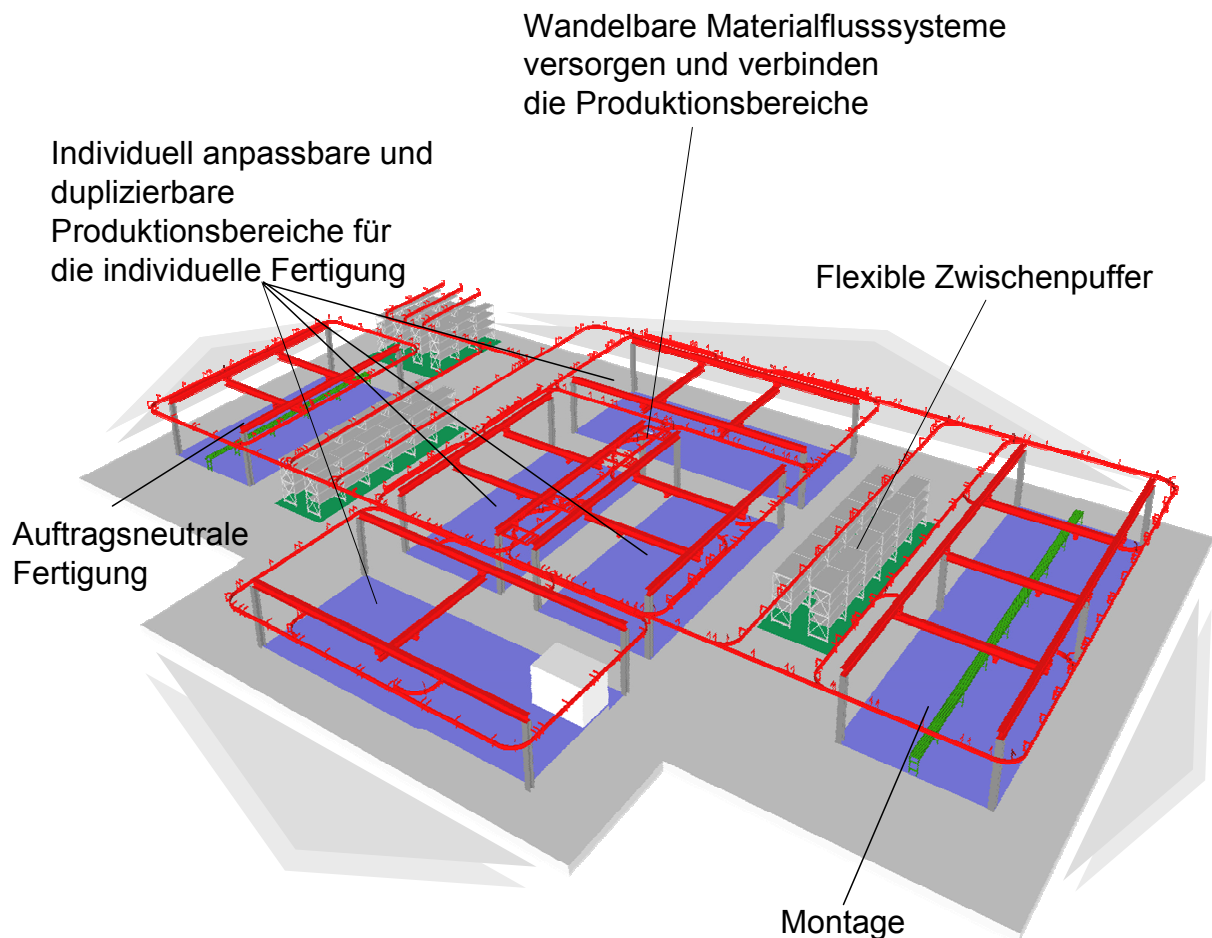


Abbildung 7-1: Referenzszenario für ein wandelbares Materialflusssystem

Nachdem die einzelnen Bereiche mit der entsprechenden Anordnung in einem Layout festgelegt worden sind, erfolgte in einem ersten Schritt die Auswahl der Materialflusssysteme für einen Einsatz in den Fertigungsbereichen und der Versorgung der einzelnen Bereiche hinsichtlich der Flexibilität und des Wandelbarkeitspotenziales (vgl. Abbildung 7-1). Diese Auswahl erfolgte auf Grundlage der vorhin beschriebenen Anforderungen an die jeweiligen Bereiche innerhalb der Produktion. Dabei stellte sich heraus, dass insbesondere eine Kombination aus Hängekran und Elektrohängebahn (EHB) für den Einsatz in der kundenindividuellen Produktion geeignet ist.

Eine Vorauswahl weiterer geeigneter Materialflussmittel ist in Abbildung 7-2 grau hinterlegt dargestellt.

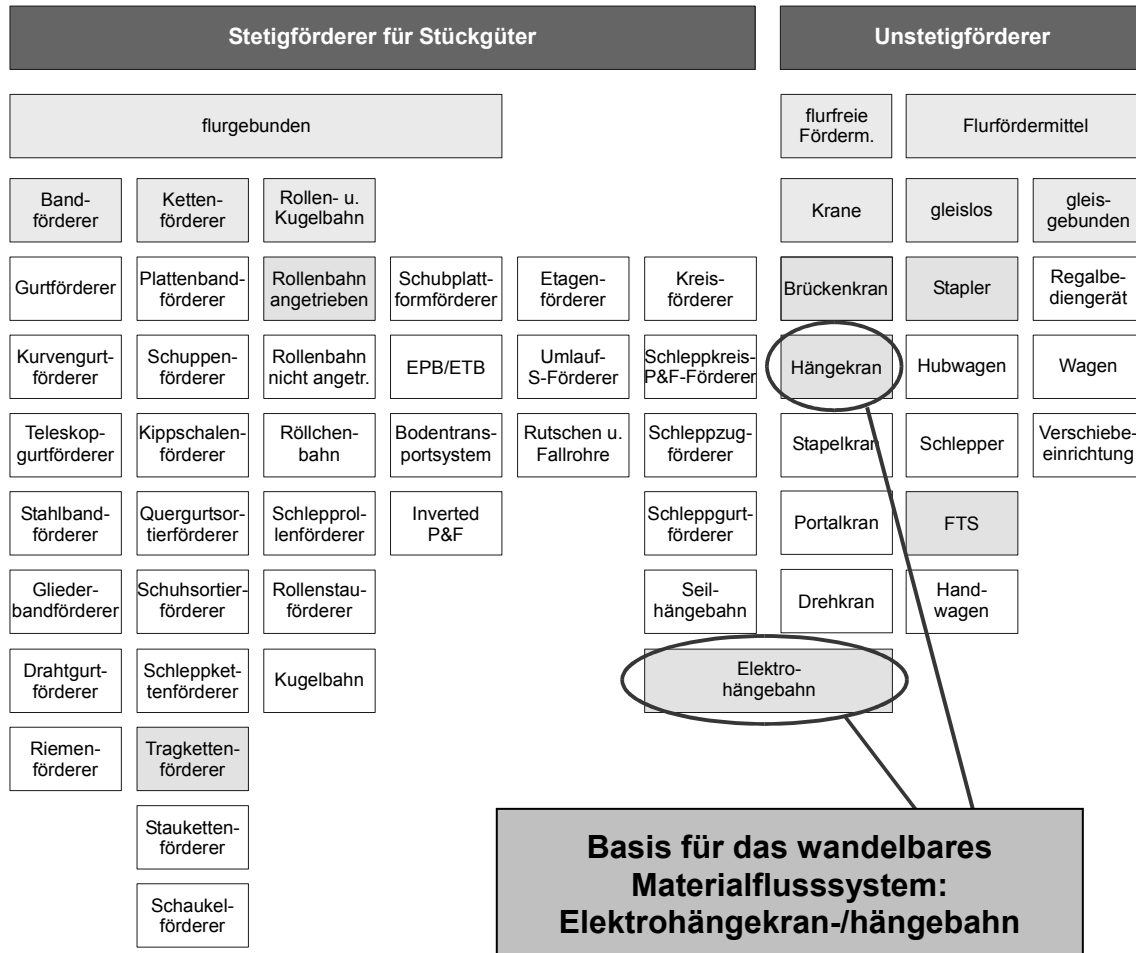


Abbildung 7-2: Fördermittelübersicht: Eingrenzung und Vorauswahl geeigneter Materialflussmittel [Wil-06]

Die einzelnen Produktionsbereiche, in denen die Fertigungsmaschinen stehen, werden von einem Hängekran von oben bedient. So ist jeder Ort im Produktionsfeld erreichbar und damit die Layoutflexibilität gewährleistet. Zusätzlich findet kein Flächenverbrauch durch Transportwege statt, da sich der Materialfluss im Überflurbereich abspielt. Die Kranfelder sind von EHB-Schienen umgeben. So lassen sich neue Bereiche erschließen und beliebig miteinander verbinden. Dabei fahren die EHB-Fahrzeuge mit ihrer Last auf die Kranbrücken auf und können so individuell jeden Punkt im Produktionsbereich bedienen. Mit dieser Anordnung ist es möglich die

Fabrik um beliebige Produktionsfelder zu erweitern und somit sind die Voraussetzungen für eine atmungsaktive Fabrik geschaffen.

Im Rahmen des Produktspektrums, für das das System ausgelegt wurde, ist das System fördergutflexibel. Bei einem Wechsel des Produktspektrums muss aber bei Bedarf durch geeignete Maßnahmen und neue Konzeptionen eine höhere Fördergutflexibilität gewährleistet werden. Die Lastaufnahmemittel und die Tragfähigkeit der Kranbrücken sind hauptsächlich für die Fördergutflexibilität verantwortlich. Deshalb müssen zum einen die Lastaufnahmemittel austauschbar gestaltet sein. Dies lässt sich mit einem funktionsorientierten modularen Aufbau erreichen. Aus wirtschaftlichen und aus sicherheitstechnischen Gründen ist es zu empfehlen, Standardtransporthilfsmittel einzusetzen. Zum anderen ließe sich durch das Zusammenkoppeln zweier Einträgerkranbrücken die Tragkraft erhöhen. Damit muss kein stärkerer Kran für seltene Transportaufträge mit großen Lasten bereitgehalten werden, der den Bedienbereich des Kranfeldes verkleinern und einen Kostenfaktor darstellen würde. Stattdessen benötigt man nur eine entsprechende Zweiträgerkranbrücke, die auf einer Stichbahn bereitsteht und im Bedarfsfall auf die zusammengekoppelten Einträgerkranbrücken auffahren kann.

Die Erhöhung der Durchsatzflexibilität ist im EHB-Bereich durch das Hinzufügen weiterer Fahrzeuge sehr gut gewährleistet. Ebenso erlaubt der variable Aufbau die Wahl alternativer und kürzerer Routen. Im Kranfeld ist aber die Durchsatzflexibilität eingeschränkt. Um den Durchsatz zu steigern, bietet sich die Möglichkeit, in das Kranfeld eine weitere Kranbrücke einzubauen. Zwar bringt ein zusätzlicher Kran noch keine Durchsatzsteigerung mit sich, da er seriell geschaltet ist. Aber durch geschicktes Auftragmanagement und Anordnung der Fertigungseinrichtungen im Produktionsfeld ließe sich durch Hinzufügen weiterer Kranbrücken eine Steigerung des Durchsatzes erreichen. Eine weitere Möglichkeit zur Durchsatzsteigerung besteht in der Verwendung von Multiple-Load-Lastaufnahmemitteln, d.h. man kann mehr als ein Fördergut auf einmal transportieren. Ebenso lassen sich durchsatzkritische Bereiche direkt von dem EHB-System versorgen.

Die Integrationsfähigkeit erlaubt den Modulen des Elektrohängekran/-hängebahnsystems, mit weiteren Materialflusssystemen wie FTS, Stapler, Stetigförderer zusammenzuarbeiten. Diese benutzen die Gänge unterhalb der EHB und können ihre Ladung direkt oder an Überplätzen an die Produktionseinrichtungen bzw.



andere Materialflussmittel abgeben. So können insbesondere die Durchsatzflexibilität und die Fördergutflexibilität gezielt an neue Rahmenbedingungen angepasst werden.

### 7.2 Produktion elektronischer Bauteile

Die weitere Verifikation der Ergebnisse des Modularisierungsansatzes aus Kapitel 5 und die Gestaltung flexibler Materialflusssysteme aus Kapitel 4 soll anhand einer bestehenden Produktion elektronischer Bauteile durchgeführt werden.

Im Rahmen der eigenen Umstrukturierung wurde bei dem betrachteten Elektronik-konzern die Möglichkeit geschaffen, die Umgestaltung eines Zweigwerks als Planungsgrundlage für die modularisierte Fabrikplanung zu beplanen. Im Rahmen einer Vorreiterrolle hat die Geschäftsleitung beschlossen, Möglichkeiten zu schaffen, auf die turbulenten Marktsituationen besser reagieren zu können. Dies soll durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden. Dabei ist ein Hauptbestandteil, von der bisherigen Linienfertigung auf eine Inselfertigung umzustellen. Die zu erwartenden Vorteile sollen eine Verkürzung der Durchlaufzeiten anhand von geringeren Liegezeiten in der Fertigung, eine Kostenreduzierung und eine stärkere Identifizierung der Mitarbeiter mit den Produkten sein.

Die Räumlichkeiten des Zweigwerks wurden 1988 von einer Näherei übernommen. Das Gelände mit einer Produktionsfläche von 3.538qm ist im Geschäftsbereich Elektronik verankert. Derzeit sind rund 120 Mitarbeiter am Standort beschäftigt. Im Laufe der Zeit wurden die Hallenflächen mehrmals erweitert, so dass eine Verschachtelung der Produktionshallen vorliegt. Im Zuge der Restrukturierungsmaßnahmen muss neben der Umstellung auf Inselfertigung auch die generelle Ausrichtung des Fabriklayouts nach dem Materialfluss neu geplant werden.

Dazu wurden die derzeitigen Materialflüsse analysiert und anhand einer hierarchischen Betrachtung die Zusammensetzung der produktiven Bereiche neu überdacht. Daher sollte vor allem auf die Modellierung des flexiblen Bereiches aus der Montage mit der Einrichtung von Fertigungspools, -gruppen und -inseln eingegangen werden.

In einem ersten Schritt erfolgte eine Strukturierung der bestehenden Fabrik in einzelne Bereiche und anschließend wurde der Materialfluss in diesen Bereichen/Modulen gestaltet. Als Abschluss der Untersuchungen wurden geeignete Materialflusssysteme für eine flexible Verkettung der Bereiche ausgewählt.

## 7.2.1 Modularisierung der Produktionsstruktur

In Abbildung 7-3 ist das aktuelle Layout der Elektronikproduktion dargestellt, das optimiert werden soll.



Abbildung 7-3: Ist-Layout der Elektronikproduktion (EG)

Die Einteilung des Betriebes auf der Ebene des 1. Ug stellt sich wie folgt dar. (vgl. Abbildung 7-4)

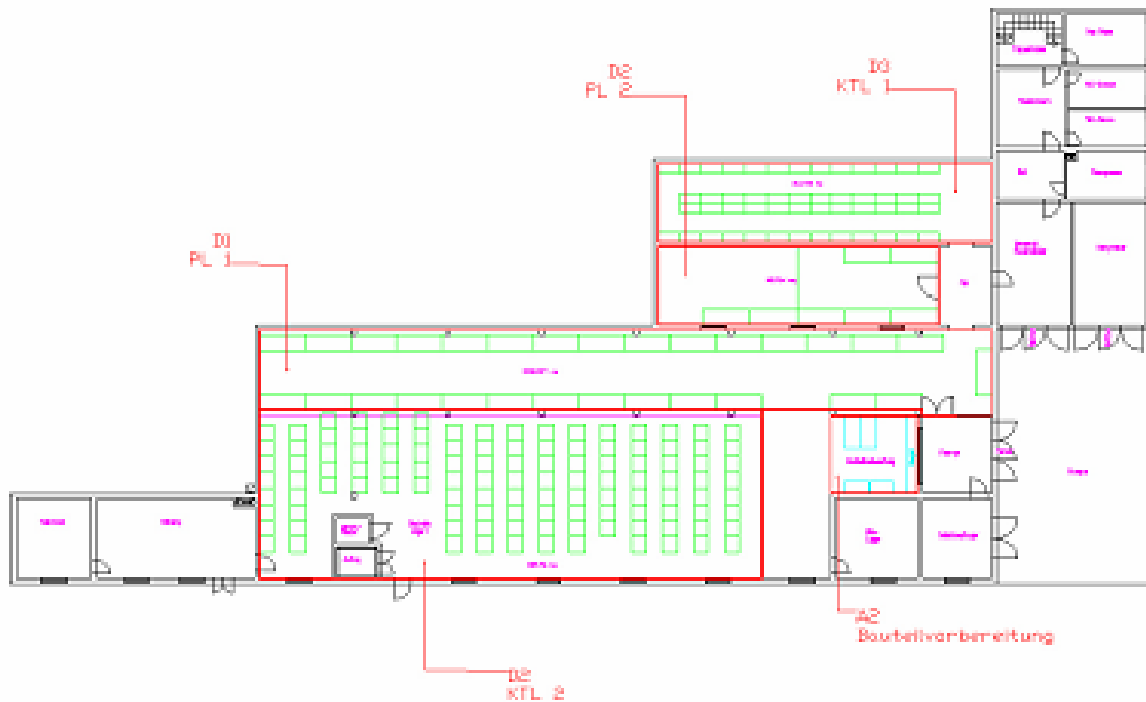


Abbildung 7-4: Ist-Layout der Elektronikproduktion (UG)

Um eine Neustrukturierung der einzelnen Bereiche durchzuführen bedarf es eine Aufnahme aller derzeitigen Prozesse, die bei der Produktion der elektronischen Bauteile durchgeführt werden müssen. Abbildung 7-5 zeigt die einzelnen Bereiche mit den entsprechenden Prozessbausteinen.

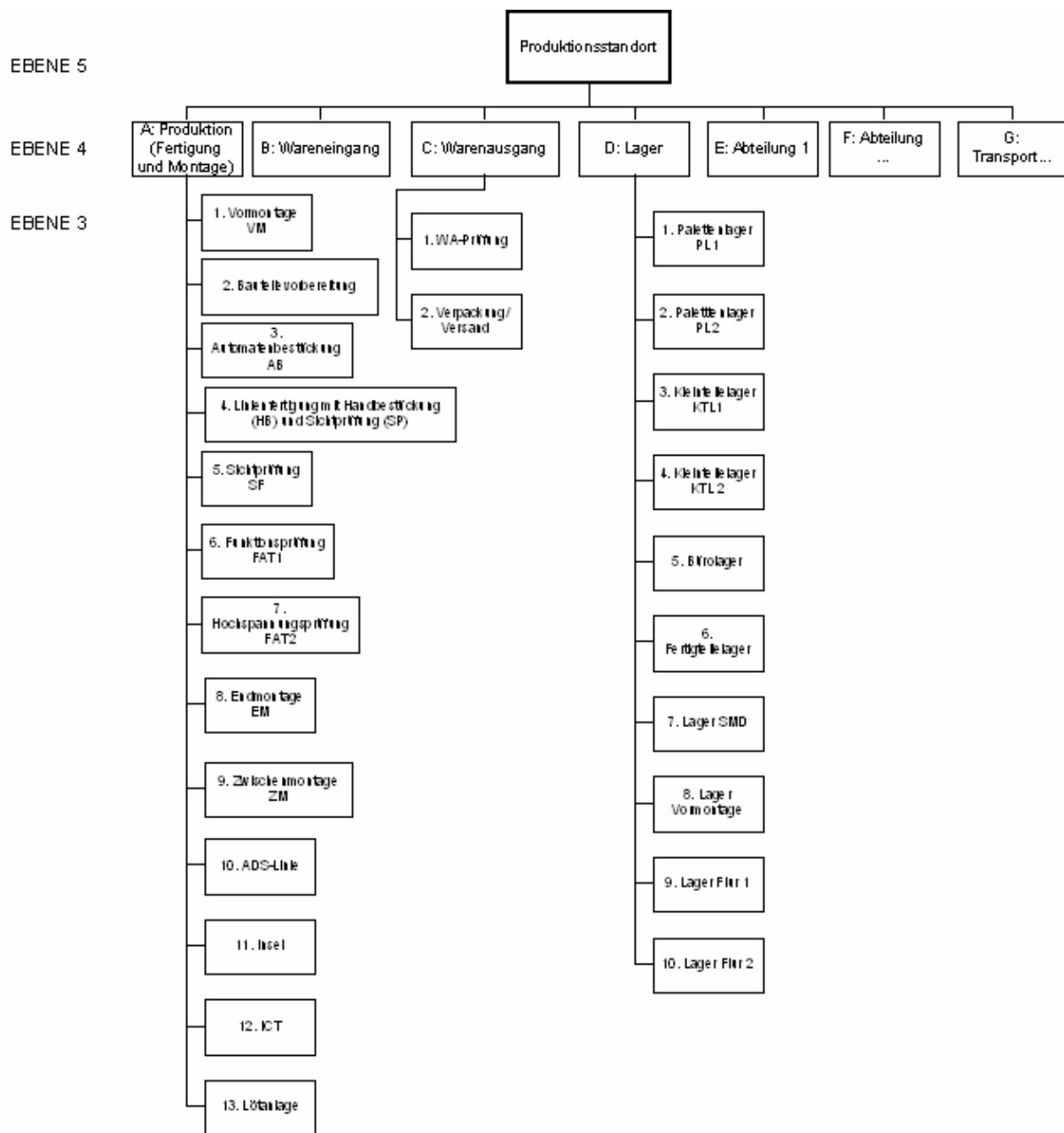


Abbildung 7-5: Ist- Zustand der Bereichsgliederung

Für die weitere Unterteilung wurden die Module der Ebene 3 weiter in Produktions-, Wareneingangs-, Warenausgangs- und Lagermodule eingeteilt und die hierarchische Zerlegung bis auf die unterste Ebene für jedes Modul durchgeführt. Exemplarisch soll dies anhand der Module Vormontage und Insel dargestellt werden.

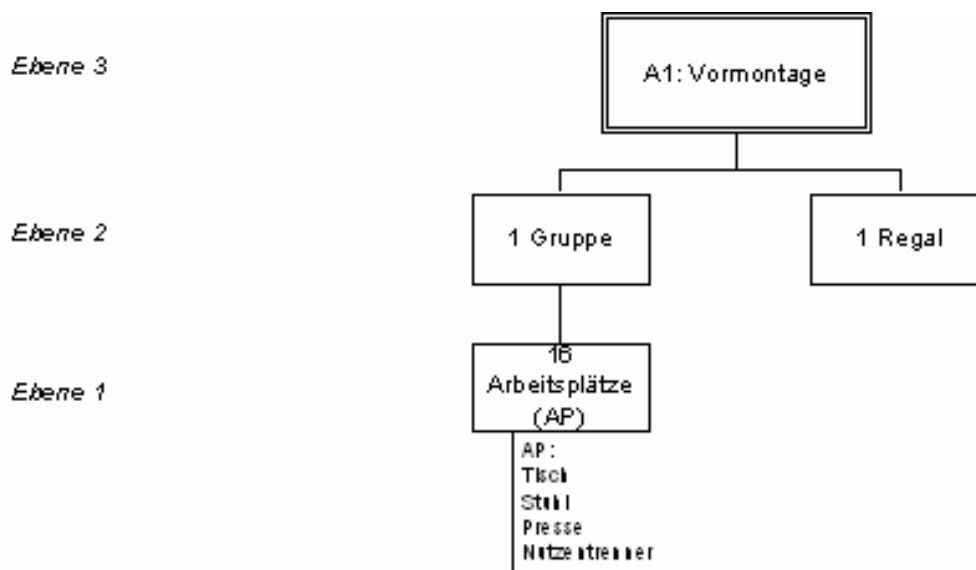


Abbildung 7-6: Gliederung Ebenen 3 bis 1 für Modul Vormontage

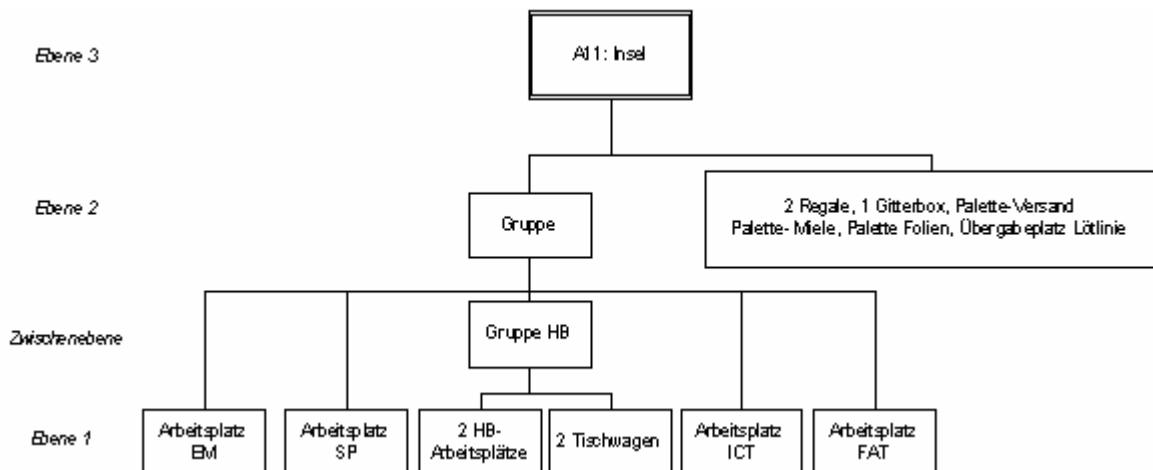


Abbildung 7-7: Organigramm Insel

Ausgehend von der IST-Aufnahme aller durchgeführten Prozesse wurden in einem nächsten Schritt die Bereiche SMD-Fertigung und Handarbeitsarbeitsplätze in der Montage neu geplant.

### Neuplanung SMD Bereich

Aufgrund der umfangreichen Anforderungen, die an die neue Gestaltung des SMD-Bereiches gestellt wurden, musste eine Erweiterung der bestehenden Hallenfläche angedacht werden.

Bei der Planung wurden folgende zwei Erweiterungsvarianten favorisiert, die in Abbildung 7-8 und Abbildung 7-9 dargestellt sind.

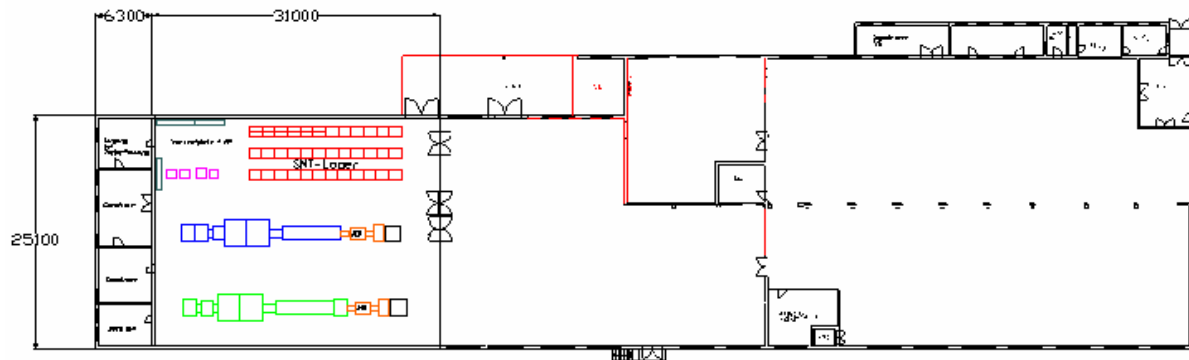


Abbildung 7-8: Erweiterungsvariante 1

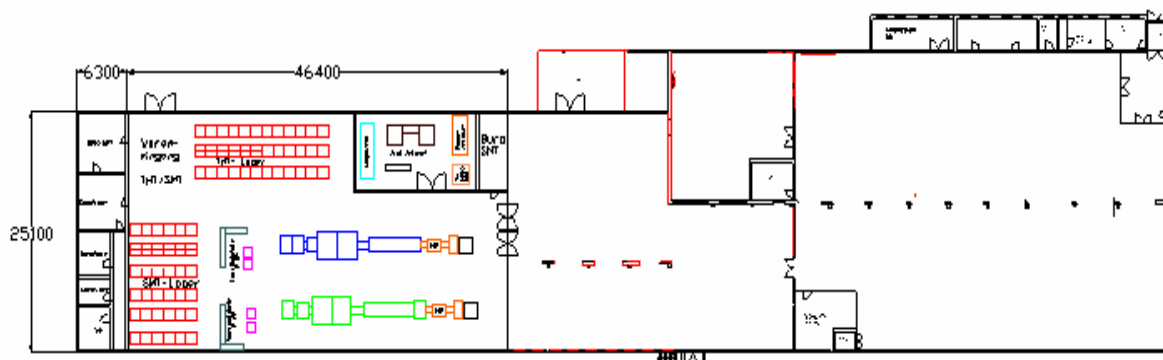


Abbildung 7-9: Erweiterungsvariante 2

Die beiden Varianten 1 und 2 sehen eine Verlängerung der bestehenden Hallen um (1) 37,3 m bzw. (2) um 52,7 m vor.

Die Erweiterungen beinhalteten verschiedene Module. In Erweiterungsvariante 1 befinden sich die Einzelplätze SMT-Linie sowie die Einzelplätze SMT-Regale, die als Bauteilvorbereitung dienen. Zusätzlich wurde das Lager für die SMT-Linien bei der Erweiterung mit berücksichtigt.

Erweiterungsvariante 2 ist im Vergleich zur Variante 2 die umfangreichere Erweiterung, die zusätzliche den gesamte Bereich Automatenbestückung enthält. Die SMT Bauteilvorbereitung ist mit den Einzelplätzen im Fabrikmodul enthalten.

Ein Vergleich der beiden Varianten untereinander zeigt, dass Alternative 2 alle Restriktionen erfüllt, die im Folgenden aufgelistet sind:

- Einordnung in den Materialfluss

Durch die Schaffung eines separaten Wareneingangs für SMT und THT-Bauteilgruppen kann der Startpunkt des Materialflusses an das westliche Ende der Produktion verlagert werden. Ebenfalls ist die Grundlage zum Outsourcing der Lager THT und SMT an einen externen Lieferanten geschaffen worden. Trotzdem ist das Lager SMT für die Mitarbeiter der SMT Vorgruppierung leicht zugänglich

- Deckentraglast

Die Restriktion durch die Deckentraglast konnten durch eine ebenerdige Erweiterung umgangen werden.

- Raumklimatisierung Tageslichtproblem

Raumklimatisierung kann für den gesamten Bereich der Erweiterung also auch für SMT- und THT- Lager durchgeführt werden. Im Bereich Wareneingang, THT-, SMT-Lager muss mit besonderen Maßnahmen der Außenbereich abgegrenzt werden. (Windfang, Doppeltüren).

- Räumlichkeiten und Brandschutz

Die Brandschutzrichtlinien können eingehalten werden, bzw. müssen durch die Erweiterung neu definiert werden. Das Modul THT-Maschine befindet sich in einem abgetrennten, schallgesicherten Raum.

- Flexible Anordnung und Erweiterungsmöglichkeiten der SMD-Linien

Die SMD- Linien sind in einer maximalen Ausprägung eingeplant worden. Für beide Linien sind alle Erweiterungsmodule und Arbeitsplätze erfasst. Die Arbeitsbereiche sind großzügig eingeplant worden.



## Planung der Handarbeitsbereiche

Durch die Erweiterung der Produktionsbereiche im Bereich Automatenbestückung wurden ausreichend Erweiterungsmöglichkeiten für die Ausgestaltung der Handarbeitsbereiche gewonnen.

Wie in Abbildung 7-10 dargestellt, steht nach der Erweiterung für das Fabrikmodul Automatenbestückung in den Handarbeitsbereichen eine größere Fläche zur Umsetzung der Gruppenmodule zur Verfügung. Im linken Bereich, dem ehemaligen Standort der Automatenbestückung, wurde ein Schnellläuferlager eingerichtet, das die Handarbeitsplätze mit häufig gebrauchten Bauteilen versorgen kann.

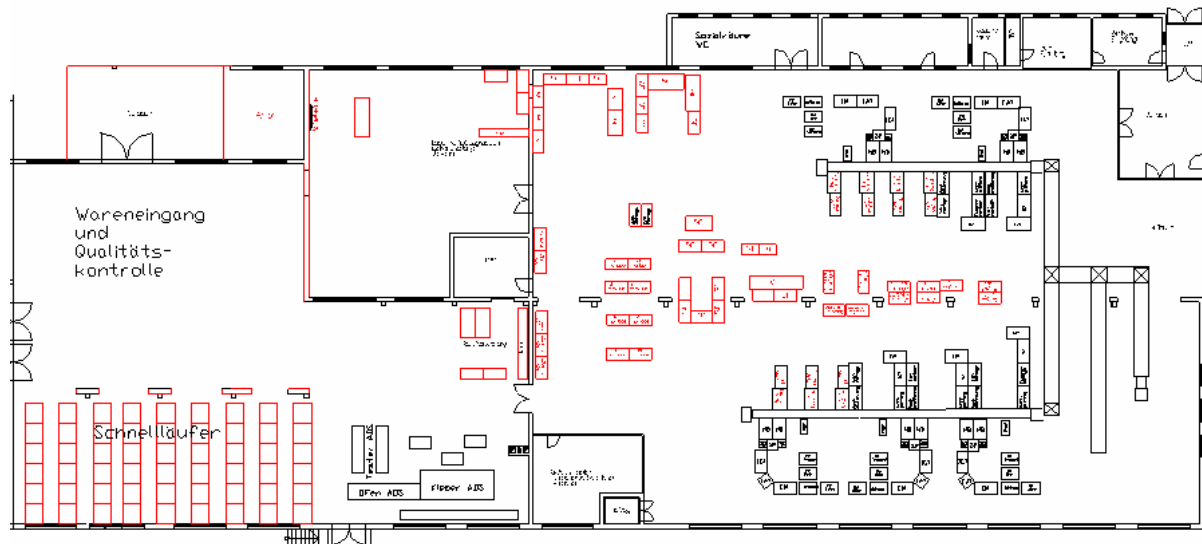


Abbildung 7-10: Bildung von Materialflussbereichen im Bereich der Handbestückung

Durch die Erhöhung der Kapazität mit einer zweiten SMD-Linie in der Automatenbestückung und einem Wandel der Lötverfahren von verbleitem Lötgut zu unverbleitem Lötgut, musste in die Fertigung der Lötlinie eine zweite Schwalllötanlage aufgenommen werden.

Für die Gestaltung der Handarbeitsplätze in der Fertigung wurden unterschiedliche Konzepte ausgearbeitet. Je nach Anforderungen können die Handarbeitsplätze zu Fertigungspools-, gruppen oder –inseln zusammengesetzt werden. Welcher dieser drei Fertigungsarten zum Einsatz kommt, ist von den Eigenschaften des herzustel-

lenden Produktes abhängig. Im folgenden sind die drei unterschiedlichen Zusammenstellungen der Handarbeitsplätze genauer beschrieben.

### Bildung von Fertigungspools

In Abbildung 7-11 sind in den unterlegten Bereichen die als Gruppenmodule gebildeten Pools dargestellt. Die Anordnung erfolgt zwischen den Lötlinien in der Anordnung nach der Materialflussrichtung des Montagedurchlaufes.

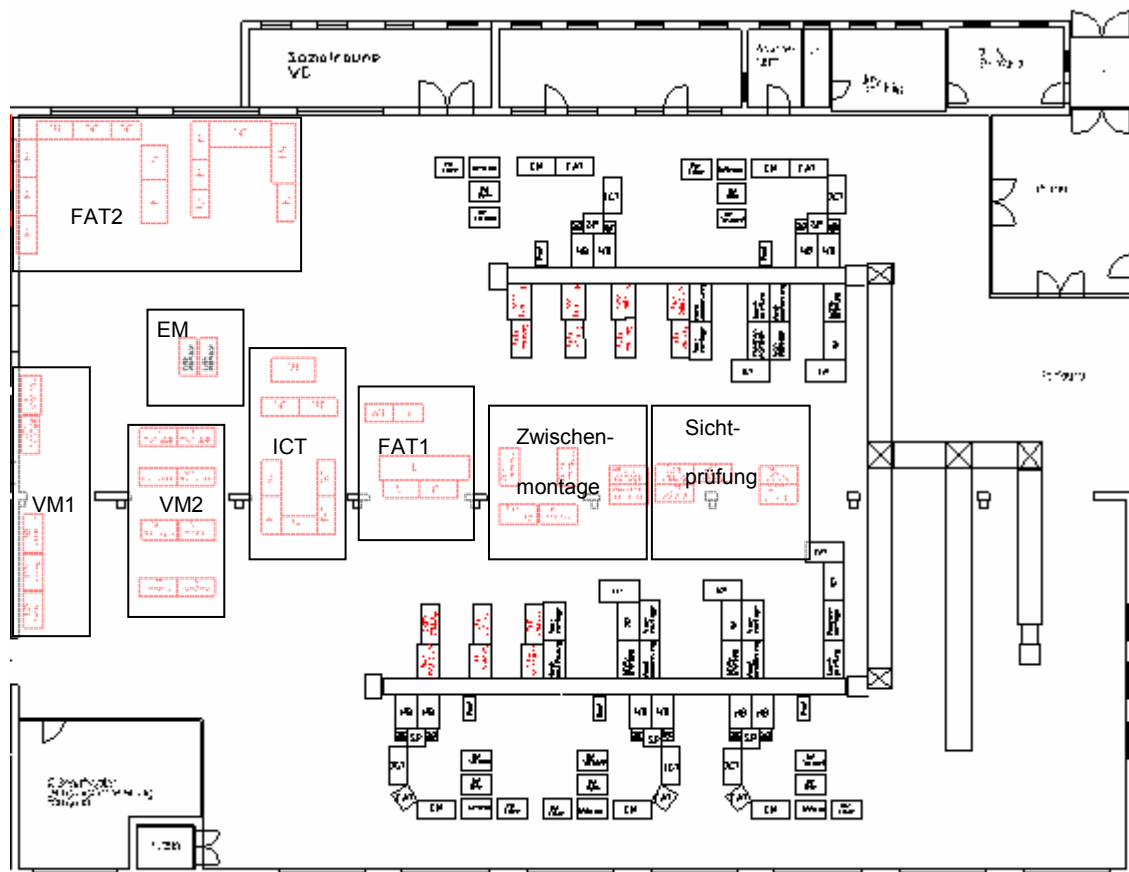


Abbildung 7-11: Darstellung des Gruppenmodule-Pools

Die in Abbildung 7-11 gebildeten Fertigungspools setzen sich aus folgenden Prozessen zusammen:

- VM1 und VM2: Vormontage
- ICT: Incircuit Test
- FAT1: Funktionsprüfung
- FAT2: Hochspannungsprüfung und nicht veränderbare Prüfkreisläufe
- Zwischenmontage
- Sichtprüfung
- EM: Endmontage

### Bildung der Fertigungsinseln

Aus den gebildeten Pools der einzelnen Handarbeitsplätze werden die entsprechenden Fertigungsgruppen und Fertigungsinseln gebildet. Da wie beschrieben Fertigungsinseln keinen starken temporären Charakter besitzen, eine Umplanung also nur selten erfolgt, werden sie an den Außenseiten der Lötlinien angeordnet.

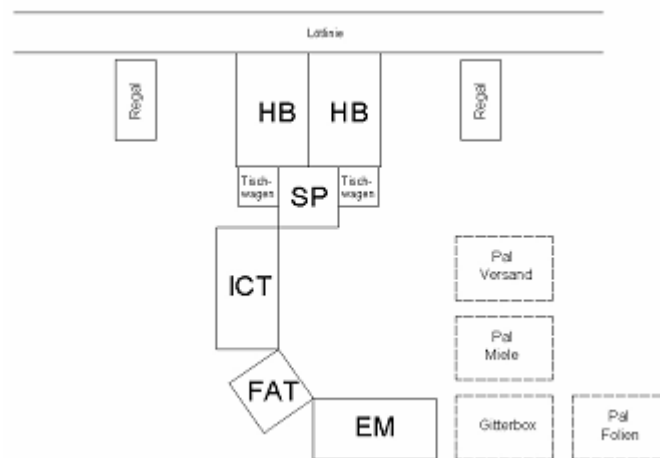


Abbildung 7-12: Fertigungsinseln

Schwachpunkt beim Aufbau von Fertigungsinseln ist aber auch geschlossener Kreislauf im Materialfluss und die getakteten Prozesse, die keine oder kaum andere als in der Insel vorgesehene Bearbeitungsschritte zulassen.

Beim endgültigen Wegfall eines Arbeitsauftrages können Fertigungsinseln aufgelöst und in die Gruppenmodule der Fertigungspools rückintegriert werden.

### Bildung der Fertigungsgruppen

Für die Bildung von Fertigungsgruppenmodulen aus den Pools gilt ein temporärer Gedanke. Je nach dem Fertigungsablauf werden die benötigten Einzelarbeitsplätze aus den Pools herausgenommen und zu Gruppen zusammengefasst. Sobald der Arbeitsauftrag abgearbeitet ist, wird die Rückbildung vorgenommen. Liegt ein ähnlicher Fertigungsauftrag vor, kann die Fertigungsgruppe modifiziert werden. Auf den Einzelplätzen der Gruppe sind alle möglichen zu erledigenden Arbeiten mit ihren Taktzeiten hinterlegt. So ist aufgrund der Mobilität der Einzelplätze eine schnelle Umgestaltung der Fertigungsgruppen möglich.

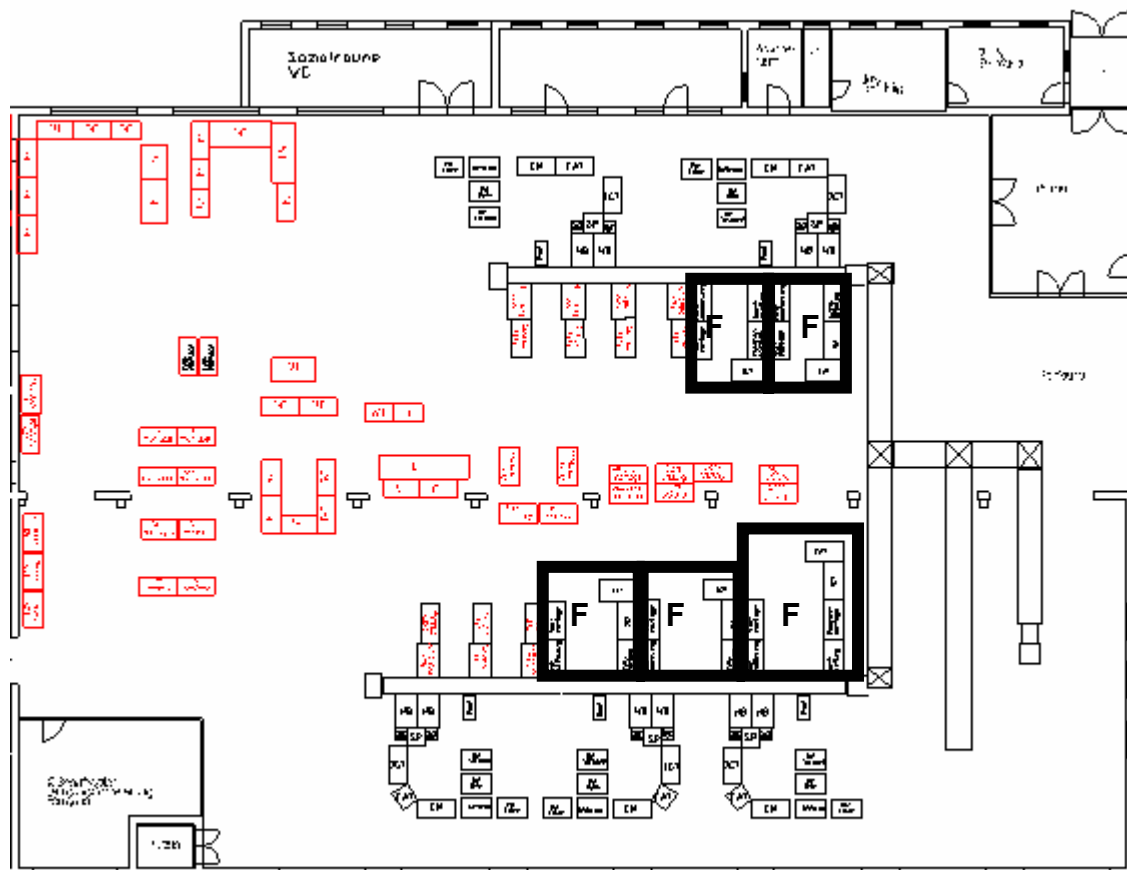


Abbildung 7-13: Fertigungsgruppen als Gruppenmodule

In Abbildung 7-13 sind die 5 geplanten Fertigungsgruppen hervorgehoben. (FG1 bis FG5) Die Fertigungsgruppen sind an der Innenseite der Lötlinie gebildet worden,

damit eine schnelle und reibungslose Rückbildung der Fertigungsgruppen und eine Einbindung der Einzelplätze in die Fertigungspools gewährleistet werden kann. Die Fertigungsgruppen bestehen im Einzelnen aus:

- Einzelplatz Vormontage
- Einzelplatz Handbestückung
- Anbindung an die Lötlinie
- Einzelplatz Sichtprüfung
- Einzelplatz Zwischenmontage
- Einzelplatz ICT
- Einzelplatz FAT

Nach dem die komplette Produktion auf Basis der in diesem Projektes erarbeiteten Modularisierungsmethodik neu strukturiert wurde und für die Fertigung neue Fertigungskonzepte erarbeitet worden sind, galt es als letzten Planungsschritt die materialflusstechnische Verkettung der einzelnen Bereiche zu gestalten.

### **7.2.2 Planung des Materialflusses**

Im Rahmen der Layoutplanung musste das Modul Automatenbestückung in dem Erweiterungsanbau ausgelagert werden. Das dort installierte Lager, das von Lieferanten versorgt extern versorgt werden musste, bildet den Ausgangspunkt des Wertschöpfungsprozesses. In der Automatenbestückung werden Leiterplatten mit Bauteilen über die SMD- und THD- Technologie bestückt. Der weitere Verlauf des Materialflusses wurde über ein Schnellläuferlager geplant. Die von der Automatenbestückung bearbeiteten Teilaufträge wurden im weiteren Verlauf des Materialflusses mit den notwendigen Bauteilen versorgt und zum nächsten Wertschöpfungsschritt transportiert. Die Richtung des Materialflusses ist in Abbildung 7-14 dargestellt.

Der Vorteil, den Teilaufträgen die benötigten Bauteile beizulegen, besteht darin, keine Stellflächen in der Montage für Bauteile bereitstellen zu müssen. Einzig die Übergabepplätze und die in den jeweiligen Einzelplatzmodulen befindlichen Lagermodule stellen dann noch Pufferflächen für noch nicht bearbeitete Bauteile dar.

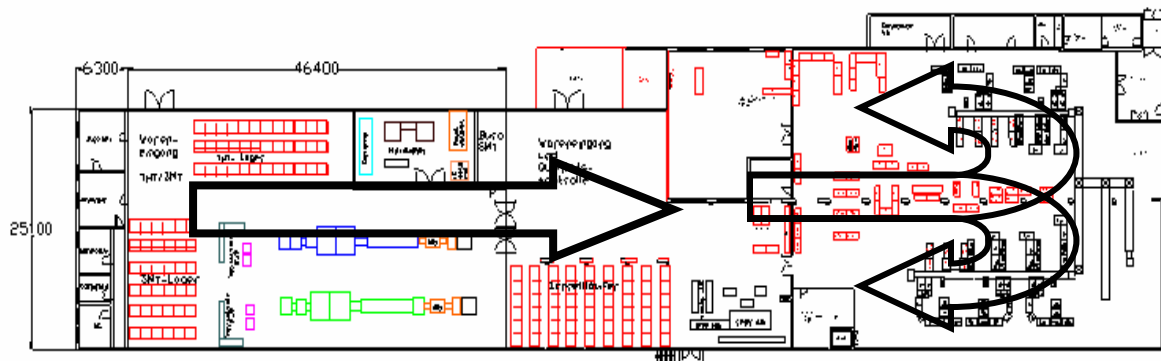


Abbildung 7-14: Hauptrichtung des Materialflusses

Als Transportmittel wurde eine Kombination aus Elektrohängbahn und Kranfelder ausgewählt (vgl. Abbildung 7-15). Dabei dient die Elektrohängebahn zur Überbrückung längerer Strecken, z.B. der Verknüpfung der Automatenbestückung mit dem Montagebereich. Während der Bereich Automatenbestückung nur durch wenige Übergabepunkte an den Enden der Einzelarbeitsplätze Sichtprüfung oder im Übergabepunkt des Moduls THT Maschinen Schnittstellen zum übergeordneten Modul Transport besitzt, sind im Montagebereich viele Übergabestellen zu bewältigen.

Da durch die Bildung von variablen Pools, Fertigungsgruppen oder Fertigungsinseln keine dauerhaften, also fest definierte Übergabeorte zu bestimmen sind, muss hier die flexible Materialversorgung über verknüpfte Kranfelder erfolgen, die jeden Punkt des Hallenbereiches versorgen können. Eine flexible Materialversorgung wird über die den Einzelplätzen und Modulen zugeordneten Übergabepunkte erreicht. Eine Steigerung des Durchsatzes kann man mit dieser Systemkonfiguration durch das Hinzufügen weiterer Katzen ohne größeren Aufwand erreicht werden.

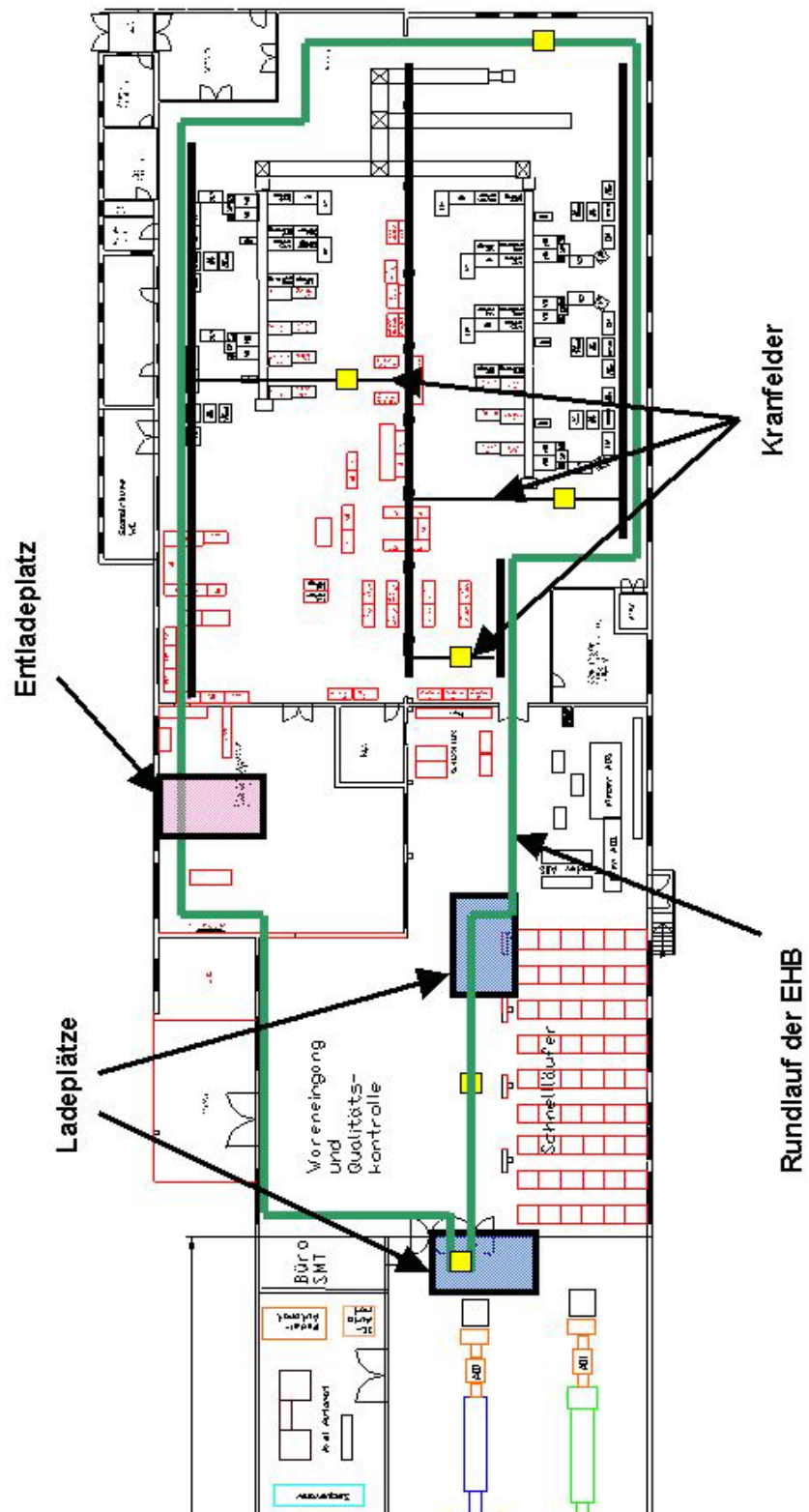


Abbildung 7-15: Materialflusstechnische Verkettung der Produktionsbereiche





## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Zunehmende Verkürzungen der Produktlebenszyklen in Verbindung mit einem hohen Innovationsdruck im Bereich der Produktionstechnologien, der Trend zur Fertigung kundenindividueller Produkte und damit gekoppelt eine hohe Variantenvielfalt erfordern eine schnelle und effiziente Anpassung der Fabrikstruktur hinsichtlich Größe, Funktion und Strukturen auf veränderte Rahmenbedingungen.

Flexible und wandelbare Fabrikstrukturen werden zunehmend zu Erfolgsfaktoren für den Erhalt und den Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit von Fabriken. Wandlungsfähigkeit – auf die technische Seite bezogen auch Wandelbarkeit genannt – ist dabei als eine Art Steigerung von Flexibilität anzusehen. In Ergänzung zur Flexibilität, die eine Anpassungsfähigkeit in vorgehaltenen Dimensionen und Szenarien beschreibt, müssen wandelbare Fabrikstrukturen zusätzlich die Anforderung erfüllen, auf ungeplante und vorab nicht bedachte Ereignisse selbständig reagieren zu können. Bei Gestaltung von wandelbaren Fabrikstrukturen spielen Materialflusssysteme eine große Rolle. Veränderungen in dynamischen Produktionsstrukturen, hervorgerufen z.B. durch neu eingeführte Produkte oder Produktionsverfahren, führen in den meisten Fällen direkt zu Veränderungen in den innerbetrieblichen Materialflusssystemen, vor allem bei Transportsystemen zwischen den Fertigungsbereichen.

Bei der Bewertung der Flexibilität von Materialflusssystemen kristallisierten sich die Anforderungen nach Layout-, Fördergut- und Durchsatzflexibilität heraus. Damit ein System wandelbar ist, also auf alle ungeplanten Ereignisse reagieren kann, müssten diese drei Anforderungen zu 100% erfüllt sein. Ein wirtschaftlicher Betrieb wäre aber damit nicht mehr möglich. Somit müssen Materialflusssysteme die Eigenschaft aufweisen, durch systemeigene Komponenten erweitert (Erweiterungsfähigkeit) oder durch andere, verschiedenartige Systeme neu ergänzt zu werden (Integrationsfähigkeit). Welche dieser beiden Methoden angewandt wird, um das Flexibilitätspotenzial an die neuen Anforderungen anzupassen, ist am Ende eine Frage der Wirtschaftlichkeit. Eine Auswahl von Materialflusssystemen erfolgt in der Grobplanungsphase anhand der Mindestflexibilitätsanforderungen, die auf in der Zukunft geplante Ereignisse beruhen und somit vorhersehbar sind. Dabei wird nochmals unterschieden, ob in die Flexibilität sofort investiert wird, oder ob z.B. aus wirtschaftlichen Gründen das Flexibilitätspotenzial erst später aktiviert wird. In diesem Fall wurde der Begriff der

erweiterten Flexibilität eingeführt. Die Aktivierung kann durch systemeigene Komponenten oder durch den Einsatz systemfremder Materialflusssysteme erfolgen. Falls im laufenden Betrieb zu einem späteren Zeitpunkt dieses vorgegebene Potenzial nicht mehr ausreicht, bedarf es einer Anpassung des bestehenden Systems durch die Eigenschaften „Erweiterungsfähigkeit“ und „Integrationsfähigkeit“. Durch diese Fähigkeiten wurde ein wandelbares Materialflusssystem charakterisiert.

Am Beispiel der Materialflussfunktion „Transportieren“ wurden Kriterien für die Bewertung der Layout-, Durchsatz- und Fördergutflexibilität erarbeitet. Mit Hilfe dieser Kriterien ist es in der Planungsphase möglich, anhand der geforderten Flexibilität eine Vorauswahl der zur Verfügung stehenden Materialflusssysteme zu treffen. Dabei handelt es sich um eine Vorauswahl anhand der Flexibilitätsanforderungen. Falls das geplante Flexibilitätspotenzial nicht ausreicht, bedarf es einer Erweiterung des bestehenden Systems oder der Integration von anderen Materialflusssystemen. Für die Erweiterung des bestehenden Systems mit eigenen Komponenten wurde ein Maßnahmenkatalog erarbeitet.

Auf Basis der beschriebenen Anforderungen an wandelbare Materialflusssysteme galt es in der weiteren Vorgehensweise eine geeignete Methodik für die Gestaltung von zukünftigen Systemen zu erarbeiten. Ein Ansatzpunkt stellte dabei die Methode der funktionsorientierten Modularisierung dar. Grundidee war dabei, das Materialflusssystem aus einzelnen Technikmodulen zusammensetzen, um somit die geforderte Mindestflexibilität zu erreichen. Falls eine Erhöhung der Flexibilität erforderlich ist, können einzelne Module ausgetauscht und somit gezielt die einzelnen Flexibilitätsarten verändert werden. Aufbauend auf die Grundlagen der allgemeinen Systemtheorie wird als erster Modularisierungsschritt eine hierarchische Strukturierung der Fabrikstrukturen und –prozesse gewählt. Für die so entstandenen Bereiche und Prozesse werden die dort benötigten Materialflussfunktionen, die in die Funktionen „Transportieren“, „Lagern“ und „Handhaben“ untergliedert sind, ausgewählt und die lokalen Kennwerte für diese Funktionen bestimmt. Auf Basis der in den lokalen Kennwerten hinterlegten Kennzahlen und Flexibilitätskriterien werden zur Erfüllung der geforderten Materialflussfunktionen geeignete Subsysteme ausgewählt. Dabei kann eine Funktion durch mehrere verschiedenartige Subsysteme erfüllt werden. Nach der Auswahl geeigneter Subsysteme können diese auf Basis der lokalen Kennwerte aus einzelnen Technikmodulen zusammengebaut werden. Die Strukturierung in Technikmodulen erfolgt nach der Methode der funktionsorientierten Modul-

arisierung. Mit dem erarbeiteten Modularisierungsansatz bestehen zwei unterschiedliche Möglichkeiten, das Flexibilitätspotenzial anzupassen. Als erste Möglichkeit kann das eingesetzte Subsystem durch systemeigene Technikmodule erweitert und an die neuen Flexibilitätsanforderungen angepasst werden. Ist dies aus technischer Sicht nicht mehr möglich oder wirtschaftlich nicht sinnvoll, kann zusätzlich neben dem ursprünglichen Subsystem ein zusätzliches systemfremdes Subsystem die Flexibilität erhöhen. In beiden Fällen kann somit gezielt eine Anpassung drei Flexibilitätskriterien erfolgen.

Auf Basis der erarbeiteten Modularisierungsmethodik galt es für die Technikmodule eine standardisierte Beschreibung zu entwickeln, die sowohl für den Planer eine Unterstützung darstellt als auch zur Steuerung der Materialflusssysteme eingesetzt werden kann. Somit existiert für jedes Technikmodul eine einheitliche, eindeutige Datenbasis, die Voraussetzung für einen durchgängigen, ortsübergreifenden Einsatz ist und in der alle innerhalb eines Lebenszyklus eines Technikmoduls notwendigen Daten gespeichert werden.

Aufbauend auf die Standardisierung der Modulbeschreibung, die alle wesentlichen Daten für die Planung und Steuerung enthält, wurde anschließend eine Datensprache ausgewählt, die sowohl der Planer als auch die Steuerung lesen kann. Mit Hilfe der Datensprache XML, die diese Anforderungen erfüllt, ist es möglich, die Informationen in der Technikmodul- und Subsystembeschreibung so zu kodieren, dass eine hierarchische Struktur mit Überpunkten und Elementen zur Verfügung steht, was der Übersichtlichkeit und Datentransparenz dient.

Mit dieser Arbeit wurde eine Methodik zur Bewertung und Gestaltung wandelbarer Materialflusssysteme auf Basis einer modularisierten Struktur erarbeitet. Die Modularisierung wurde überwiegend am Beispiel der Materialflussfunktion „Transportieren“ durchgeführt. Die Festlegung dieser Vorgehensweise wurde allgemein gehalten, so dass diese auf die anderen Materialflussfunktionen, insbesondere auf die Funktionen „Lagern“ und „Handhaben“, übertragbar sind. Somit kann damit ein kompletter Baukasten erstellt werden, der alle Module, die für die Planung von Materialflusssystemen erforderlich sind, enthält. Um diesen Baukasten für den Planer nutzbar zu machen, kann in einem nächsten Schritt eine Datenbank implementiert werden, in der alle zur Verfügung stehenden Technikmodule hinterlegt sind.

Bei der Erstellung der standardisierten Modulbeschreibung wurden hauptsächlich diejenigen Daten abgebildet, die für die Planung und die Steuerung von Materialflusssystemen relevant sind. Ziel ist es jedoch, die Modulbeschreibungen auszubauen, so dass alle für den Lebenszyklus eines Technikmoduls benötigten Daten vorliegen. Zusätzliche Informationen können z.B. Daten über die Wartung, über die Entsorgung bzw. Recycling des Moduls darstellen. Darüber hinaus sollen Daten vorliegen, die für die visuelle Darstellung in einem VR-Modell oder für eine Ablaufsimulation benötigt werden.

Für die Beschreibung eines Technikmoduls soll nur noch ein einziger Datensatz zur Verfügung stehen und somit eine redundante Datenhaltung vermieden werden. Idealerweise sollten Informationen direkt auf dem Modul gespeichert werden. Moderne Ident-Technologien, wie es z.B. der Transponder darstellt, wurden in den letzten Jahren massiv weiterentwickelt und könnten mit ihrer Fähigkeit, größere Datenmengen zu speichern, als Informationsträger für die Modulbeschreibungen dienen.

Werden alle für die Planung und den Betrieb benötigten Daten in einer einzigen Modulbeschreibung hinterlegt, sind die Voraussetzungen für das angestrebte Ziel einer digitalen Fabrikplanung geschaffen.

## 9 Literaturverzeichnis

- [Abe-03] Abele, E.; Radtke, P.; Blitzer, A.:  
Automobilindustrie im Wandel – Wertschöpfungsarchitekturen der Zukunft. In: Marktchance Individualisierung. Reinhart, G., Zäh, M. F. (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.
- [Agg-01] Aggteleky, B.:  
Fabrikplanung, Band 1-3. München, Wien: Hanser, 1987 (Band 1), 2001 (Band 2) und 1990 (Band 3)
- [All-99] Allgayer, F.:  
Computergestützte Planung von Materialflusssystemen auf Basis statischer Materialflüsse. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 1999.
- [Arn-03] Arnold, D.:  
Materialfluss in Logistiksystemen. Berlin, Springer, 2003
- [Bal-98] Baldwin, C.; Clark, K. B.:  
Modularisierung: Ein Konzept wird universell. In: Harvard Business Manager (1998) 2, S. 39 - 48, 1998.
- [Bam-00] Bambynek, A.:  
Flexible Fördersysteme – Einbindung einer flurfreien Krananlage, Hebezeuge und Fördermittel, Berlin 40 (2000) 5, S. 276-280
- [Bam-01] Bambynek, A.:  
Flurfreie Fördersysteme im automatisierten Materialfluss. Herbert Utz Verlag, München 2001.
- [Bau-02] Bauer, N.:  
Das BMW-Werk Leipzig - ein Beispiel für flexible Logistikstrukturen, 11. Deutscher Materialflusskongress, 14.-15. März 2002, München
- [Ble-99] Blessing, S.:  
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 1999 (iwb Forschungsberichte 134).
- [Bri-02] Briel, R. v.:  
Ein skalierbares Modell zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Anpassungsinvestitionen in ergebnisverantwortlichen Fertigungssystemen. Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2002.

- [Boe-02] Boeckh, M.:  
Zulieferer werden Teil der Automobilfabrik 2020, VDI Nachrichten,  
5.April 2002, Nr. 14
- [Bro-86] Brockhaus, F. A.:  
Brockhaus Enzyklopädie. Mannheim, 1986
- [Buc-01] Buchwitz, M.:  
Auf neuen Wegen zu Standards für verteilte Intelligenz, Tagungsband  
/ SPS IPC Drives Nürnberg 2001, Hüthig GmbH & Co. KG Heidelberg
- [Bul-94] Bullinger, H.-J.; Lung, M. M.:  
Planung der Materialbereitstellung in der Montage. B.G. Teubner,  
Stuttgart, 1994.
- [DIN-15146] Deutsches Institut für Normung e.V.:  
DIN 15146: Vierwege-Fachpaletten aus Holz. Beuth Verlag, Berlin  
1991.
- [DIN-15155] Deutsches Institut für Normung e.V.:  
DIN 15155: Gitterboxpalette mit 2 Vorderwandklappen. Beuth Verlag  
Berlin, 1986.
- [DIN-30820] Deutsches Institut für Normung e.V.:  
DIN 30820 Teil 1-5: Klein-Ladungs-Träger-System (KLT-System).  
Beuth Verlag Berlin, 1989.
- [DIN-55510] Deutsches Institut für Normung e.V.:  
Verpackung – Modulare Koordination im Verpackungswesen – Teil 1:  
Grundlagen, Teil 2: Terminologie, Teil 3: Regeln und Maße, Beuth  
Verlag Berlin, 2005.
- [DeT-98] DeToni, A.; Tonchia, S.:  
Manufacturing flexibility: a literature review. In: International Journal of  
Production Research, Vol. 36, No. 6, S. 1587, 1998.
- [Dom-04] Dombrowski, U.; Quack, S.:  
Die ungenutzten Potenziale in bestehenden Fabriken. In: 5. Deutsche  
Fachkonferenz Fabrikplanung, Tagungsband, 31. März – 1. April  
2004, Stuttgart.
- [Dov-01] Dove, R.:  
Agile Production: Design Principles for Highly Adaptable Systems. In:  
Zandin, K. B. (Hrsg.): Maynard's Industrial Handbook, 5. Aufl. New  
York: McGraw-Hill, 2001.

- [Dud-01] Auberle, Anette (Hrsg.):  
Duden, Herkunftswörterbuch der deutschen Sprache; 3. Auflage.  
Mannheim: Dudenverlag, 2001.
- [Due-01] Dürrschmidt, S.:  
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 2001 (iwb Forschungsberichte 152).
- [Ert-99] Ertl, G.:  
Bodenfreie Netze für den Materialfluss, Deutsche Hebe- und Förder-  
technik, 6/99, S. 62-65
- [Ets-00] Etschberger, K.:  
Controller Area-Network, 2. Aufl., Carl Hanser Verlag München Wien,  
2000.
- [Eve-96] Eversheim, W.; Schernikau, J.; Goeman, D.:  
Module und Systeme: Die Kunst liegt in der Strukturierung. In: VDI-Z  
138 (1996)11/12, S. 44-48, 1996
- [Eve-01] Eversheim, W.; Neuhausen, J.:  
Modular Plant Architecture – An Approach towards Agility an Recon-  
figurability. In: wt Werkstatttechnik, Jahrgang 91 (2001) H. 10, S. 654  
– 657, Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 2001.
- [Fis-97] Fischer, W.; Dittrich, L.:  
Materialfluss und Logistik: Optimierungspotenziale im Transport- und  
Lagerwesen. Berlin, Springer, 2003
- [Göp-98] Göpfert, J.:  
Modulare Produktentwicklung. Gabler, Wiesbaden, 1998
- [Gol-98] Gollwitzer, M.; Karl, R.:  
Logistik-Controlling, Wirtschaftsverlag Langen Müller/Herbig, 1998.
- [Gol-99] Gollos, M.:  
Produktionssysteme und Materialfluss schnell und kostengünstig an  
kurze Produktlebenszyklen anpassen, Logistik im Unternehmen 13  
(1999), Nr. 10, S.52-53
- [Gün-91] Günthner, W. A.:  
Wirtschaftliche Lager und Materialflusstechnik / Seminarband. Ost-  
bayerisches Technologie-Transfer-Institut (OTTI), Regensburg, 1991

- [Gün-97] Günthner, W. A.; Allgayer, F.:  
Verbundforschungsprojekt „Matvar“ ist angelaufen – Dynamische Produktionsstrukturen durch flexible Materialflußsysteme. In: Logistik im Unternehmen 11 (1997), Nr. 10, S. 28-30.
- [Gün-98a] Günthner, W.A., Bambynek, A.:  
Integrierbarkeit eines flurfreien Leichtfördersystem: Schnittstellen-Baukasten, Hebezeuge und Fördermittel 38 (1998) Nr. 12, S. 593-595
- [Gün-98b] Günthner, W. A., Handrich, W.:  
Ein Ansatz für mehr Flexibilität: Leichtfördersystem im Überflurbereich, F+H Fördern und Heben 48 (1998) Nr. 1.2
- [Gün-00] Günthner, W.A.:  
Verbundforschungsprojekt MATVAR – Wege zum wandelbaren MaterialflussnetGün-03az, Hebezeuge und Fördermittel, Berlin 40 (2000) 5, S. 267 – 270
- [Gün-02] Günthner, W. A.; Heinecker, M.; Wilke, M.:  
Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen. In: Industrie Management 18 (2002) 5, GITO mbH Verlag für Industrielle Informationstechnik und Organisation, Berlin, 2002.
- [Gün-03a] Günthner, W. A.; Wilke, M.:  
Mass Customization requires changeable material flow systems. In: Interdisciplinary World Congress on Mass Customization an Personalization (MCPC2003), Oct. 2003.
- [Gün-03b] Günthner, W. A.; Wilke, M.:  
Materialflusstechnologie – Anforderungen und Konzepte für wandelbare Fabrikstrukturen, 21. Dortmunder Gespräche, September 2003.
- [Gün-04] Günthner, W. A.; Heinecker, M.:  
Modulare Materialflusssysteme – Ein Erfolg versprechenden Konzept für wandelbare Fabrikstrukturen. Internetplattform Logistics.de, 08/2004.
- [Gün-05a] Günthner, W. A.:  
Planung technischer Logistiksysteme. Vorlesungsskriptum: fml Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München, 2005.
- [Gün-05b] Günthner, W. A.:  
Anpassungssituationen im automobilen Netzwerk – Eine Wertung der Akteure. In: Industrie Management 21 (2005) 5, GITO mbH Verlag für Industrielle Informationstechnik und Organisation, Berlin, 2005.



- [Gün-05c] Günthner, W.A. et al.:  
Zwischenbericht 2005 – Bayerischer Forschungsverbund Supra-  
adaptive Logistiksysteme. München, 2005, S. 54-56
- [Gün-06a] Günthner, W.A.; Boppert, J.; Wulz, J.; Schedlbauer, M.:  
Flexibilität durch Standardisierung – Adaptive Logistikplanung. In:  
Jahrbuch Logistik 2006, S. 30-35
- [Gün-06b] Günthner, W. A.:  
Materialfluss und Logistik. Vorlesungsskriptum: fml Lehrstuhl für För-  
dertechnik Materialfluss Logistik, TU München, 2006.
- [Hau-98] Hauertmann, W:  
Simulationsgestützte projektive Auslegung von Gruppenarbeits-  
systemen in Bezug auf Flexibilität, Autonomie und Leistung.  
Shaker, Aachen, 1998.
- [Hal-99] Haller, M.:  
Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflußsysteme der  
variantenreichen Großserienproduktion. Herbert Utz Verlag Wissen-  
schaft, München, 1999.
- [Han-74] Hansen, F.:  
Konstruktionswissenschaft. Carl Hanser Verlag. München, 1974
- [Han-01] Handrich, W.:  
Flexible, flurfreie Materialflusstechnik für dynamische Produktions-  
strukturen. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München, 2001.
- [Hei-04] Heinecker, M.:  
Innovative Techniken für die Logistik - 13. Deutscher Materialfluss-  
Kongress. Industrie Management 20 (2004) 1, GITO mbH Verlag für  
Industrielle Informationstechnik und Organisation, Berlin, S. 7-8, 2004.
- [Hep-98] Heptner, K.:  
Einteilung der Lager nach ihrer Funktion. In: Dück, O. (Hrsg.): Lager-  
planung, .organisation und –optimierung. WEKA. Augsburg, 1998.
- [Her-99] Hering, E.; Draeger, W.:  
Handbuch Betriebswirtschaft für Ingenieure. Springer, Berlin, 1999.
- [Her-03] Hernández Morales, R.:  
Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung.  
VDI Verlag, Düsseldorf, 2003.

- [Hil-05] Hildebrand, T.; Mäding, K.; Günther, U.:  
Plug+Produce – Gestaltungsstrategien für die wandlungsfähige Fabrik. Institut für Print- und Medientechnik. TU Chemnitz, Chemnitz, 2005
- [Hom-04] ten Hompel, M.; Heinz, K.:  
Untersuchung und Bewertung von Fehlern in der Materialbereitstellung hinsichtlich Zeiten, Kosten und Fehlerrisiko. Abschlußbericht zum AiF-Forschungsbericht 13946, Dortmund, 2004.
- [Jün-89] Jünemann, R.:  
Materialfluß und Logistik. Springer Verlag, München, 1989.
- [Kar-98] Karl, A.:  
Wandlungsfähige Materialflusstechnik, F&H Fördern und Heben 48 (1998) Nr. 4, S. 270-273
- [Ket-84] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.:  
Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. Hanser, München Wien, 1984
- [Kla-02] Kluge, A.; Schreiber, W.; Weißner, R.:  
Zukunftsorientierte Fabrikstrukturen in der Automobilindustrie. In: wt Werkstattstechnik, Jahrgang 92 (2002) H. 4, S. 144 – 148, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [Koh-97] Kohlhase, N.:  
Integrated Variant Reduction in Practice. In: Riitahuhta, A. (Ed.): Proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design 1997, Vol. 3. Tampere, University of Technology, Finland 1997.
- [Lan-05] Langenscheidt Fremdwörterbuch online:  
<http://www.langenscheidt.de>, 2005.
- [Lin-00] Lindemann, Udo:  
Methoden der Produktentwicklung. Vorlesungsskript.  
München: Lehrstuhl für Produktentwicklung, TU München, 2000.
- [Lor-03] Lorentz, K.:  
Ein Beitrag zur verteilten und adaptiven Materialflussteuerung für Stückguttransport. Dissertation, Magdeburg, 2003.
- [Mar-98] Martin, H.:  
Transport- und Lagerlogistik: Planung, Aufbau und Steuerung von Transport- und Lagersystemen. Vieweg, Braunschweig Wiesbaden, 1998.

- [Mau-01] Maurer, A.; Stark W. A.:  
Steering Carmaking into the 21<sup>st</sup> Century. Boston Consulting Group, BCG Report, 2001
- [Mey-97] Meyer, B.:  
Object-Oriented Software Construction (Second Edition). Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 1997.
- [Nar-00] Narain, R.; Yadav, R. C.; Sarkis, J.; Cordeiro, J. J.:  
The stratic implications of flexibility in manufacturing systems. Interntional Journal of Agile Management Systems, (2000) H.2/3, S. 202-213.
- [Nyh-04a] Nyhuis, P.; Heger, C . L.; Kolakowski, M.:  
Wettbewerbsfähige Fabriken – räumlich, technologisch und organisatorisch wandlungsfähig. In: 5. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, Tagungsband, 31. März – 1. April 2004, Stuttgart.
- [Nyh-04b] Nyhuis, P.; Heger, C . L.:  
Adequate Factory Transformability at Low Costs. COMA 04 - International Conference on Competitive Manufacturing, 2004
- [Pah-97] Pahl, G. :  
Grundlagen der Konstruktionstechnik. In: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau; 19. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1997.
- [Pil-01] Piller, F. T.:  
Mass Customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. Gabler, Wiesbaden, 2001.
- [Refa-90] REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.:  
Planung und Betrieb komplexer Produktionssysteme. Hanser Verlag, München 1990.
- [Rei-99] Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Hirschberg, A.; Selke, C.:  
Reaktionsfähigkeit – Eine Antwort auf turbulente Märkte. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Heft 1-2, S. 21-24, 1999
- [Rei-00] Reinhart, G.; Selke, C.; Hirschberg, A.:  
Im Denken und Handeln wachsen. In: Tagungsband zum Münchener Kolloquium iwb/utg „...nur der Wandel bleibt“. (Hrsg.) Reinhart, G.; Hoffman, H.; München, 16./17. März 2000.
- [Rei-04] Reinhart, G.:  
Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Fabriken im globalen Wettbewerb. In: 5. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, Tagungsband, 31. März – 1. April 2004, Stuttgart.

- [Rei-05] Reinhart, G.; Günthner, W. A.:  
Fabrikplanung. Vorlesungsskriptum iwv Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München, 2005.
- [Rei-01] Reitz, U.:  
Flexibilität in der Automobilproduktion, 18. Deutscher Logistikkongress, 17.-19.10.2001, Berlin
- [Rie-54] Riebel, Paul:  
Die Elastizität des Betriebes. Köln. Westdeutscher Verlag, 1954.
- [Rop-99] Ropohl, G.:  
Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik; 2. Auflage. Carl Hanser Verlag, München / Wien, 1999.
- [Rüt-00] Rüttgers, M.; Stich, V.:  
Industrielle Logistik. Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen, Aachen, 2000.
- [Sch-89] Schuh, G.; Caesar, C.:  
Variantenorientierte Produktgestaltung – Standardisierung und Modularisierung von Serienprodukten. In: Konstruktion 42 (1989) 4, S. 207 – 211, 1989.
- [Sch-98a] Schaab, W.:  
Neuplanung von Lager- Materialflusssystemen. In: Dück, O. (Hrsg.): Lagerplanung, -organisation und -optimierung. WEKA. Augsburg 1998.
- [Sch-98b] Schuh, G.; Millarg, K.; Göransson, A.:  
Virtuelle Fabrik. Neue Marktchancen durch dynamische Netzwerke. Hanser Wiss., München, 1998.
- [Sche-99] Schenk, M.; Seelmann-Eggebert, R.:  
Logistik ein Schlüssel zu Mass Customization, IFF-UPL – Wissenschaftstage 1999: Kundenindividuelle Massenproduktion - Bedingungen und Voraussetzungen für Produkte, Fertigung und Logistik.
- [Sche-00] Schenk, M.:  
Fabrikstrukturen mit Zukunft, IRR Deutschland GmbH; Fabrikplanung, Nürnberg 28. Juni 2000, Tagungsband
- [Sche-01] Schenk, M.:  
Mehr Flexibilität gefordert, Logistik Heute, 5/2001, S. 86-87
- [Sch-01] Schulte, H.:  
Fabrikplanung bewegt sich, VDI-Nachrichten, 15.Juni 2001, Nr. 24, S. 27, VDI Verlag, Düsseldorf, 2001.

- [Sch-03a] Schuh, G.; Van Brussel, H.; Boer, C.; Valckenaers, P.; Sacco, M.; Bergholz, M.; Harre, J.:  
A Model-Based Approach to Design Modular Plant Architectures. Proceedings of the 36th CIRP International Seminar Progress in Virtual Manufacturing Systems, Saarbrücken, 2003.
- [Sch-03b] Schuh, G.; Bergholz, M.:  
Collaborative Production on the Basis of Object Oriented Software Engineering Principles, Proceedings of the 53rd CIRP General Assembly, Montreal, 2003.
- [Sch-04a] Schuh, G.; Harre, J.; Gotschalk, S.; Kampker, A.:  
Design for Changeability – Das richtige Maß an Wandlungsfähigkeit finden. In: wt Werkstatttechnik, Jahrgang 94 (2004) H. 4, S. 100, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004.
- [Sch-04b] Schuh, G.; Merchiers, A.:  
Entwicklung eines Geschäftsmodells für mobile Fabriken. Shaker Verlag, Aachen, 2004.
- [Sch-05] Schuh, G.; Wemhöfer, N.; Friedrich, C.:  
LicoPro – Lifecycle oriented evaluation of automotive body shop flexibility. In: Zäh, M. F. et al. (EDS.), CARV 2005
- [Sua-96] Suarez F.; Cusumano, M.; Fine, G.:  
Wie flexibel produziert Ihre Fabrik? Harvard Business Manager 2, S. 36-44, 1996.
- [Spa-01] Spath, D.; Baumeister, M.; Dill, C.:  
Ist Flexibilität genug? Zum Management von Turbulenzen sind neue Fähigkeiten gefragt. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 96, Heft 5, S.235 - 241, 2001.
- [Spa-03] Spath, D.; Kürümlüöglu, M.; Nostdal, R.:  
Mass Customisation in der Schuhindustrie: Der kundenindividuell gefertigte Schuh. In: Marktchance Individualisierung. Reinhart, G., Zäh, M. F. (Hrsg.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.
- [Tan-97] Tanenbaum, A. S.:  
Computernetzwerke. Prentice Hall Verlag GmbH, München, 1997
- [Tem-93] Tempelmeier, H.: Flexible Fertigungssysteme:  
Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1993.
- [Tse-03] Tseng, M. M.; Piller, F. T.:  
The Customer Centric Enterprise. Springer, Berlin, 2003.

- [UIC 435-2] Internationaler Eisenbahnverband (UIC):  
Güternorm für eine europäische Vierweg-Flachpalette aus Holz mit den Abmessungen 800 mm \* 1200 mm. Paris, 2005.
- [Ost-93] Ost, S.:  
Entwicklung eines Verfahrens zur differenzierten Flexibilitätsanalyse und –bewertung. TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Werkzeugmaschinen und Automatisierungstechnik an der TUHH, 1993.
- [VDI-01] N.N.:  
Vollautomation oft zu unflexibel, VDI-Nachrichten, 31. August 2001, Nr. 35, VDI Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [VDI-2385] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 2385:  
Leitfaden für die Materialflussgerechte Planung von Industrieanlagen. Beuth Verlag, Berlin 1998.
- [VDI-2411] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 2411:  
Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen. Beuth Verlag, Berlin, 1970.
- [VDI-2498] Verein deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 2498:  
Vorgehen bei einer Materialflussplanung. Beuth Verlag, Berlin, 1978.
- [VDI-2860] Verein deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 2860:  
Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Definitionen, Symbole. Beuth Verlag, Berlin, 1982.
- [VDI-3581] Verein deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 3581:  
Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente. Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [VDI-3649] Verein deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.): VDI 3649:  
Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme . Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [vaB-00] Van Brussel, H., Valckenaers, P.:  
Holonic Manufacturing Systems and Multi-Agent Manufacturing Control, Pro.: 9<sup>th</sup> IMCC, Hong Kong, August 2000
- [vHi-90] Von Hippel, E.:  
Task partitioning: An innovation process variable. In: Research Policy 19 (1990), S. 407 – 418, 1990.

- [W3C-04] W3-Consortium:  
Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Third Edition), W3C Recommendation 4th February 2004, Francois Yergeau, Tim Bray, Jean Paoli, C. M. Sperberg-McQueen, Eve Maler, <http://www.w3.org/TR2004/REC-xml-20040204>, 2004.
- [War-92] Warnecke, H. J.:  
Die Fraktale Fabrik – Revolution in der Unternehmenskultur. Springer-Verlag, Berlin u.a., 1992.
- [War-95] Warnecke, H.-J.:  
Aufbruch zum fraktalen Unternehmen. Praxisbeispiele für neues Denken und Handeln, Springer Verlag, Berlin, 1995
- [War-98] Warnecke, H. J.; Sihn, W.; Wiendahl, H.H.:  
Informationstechnologie unterstützt die verteilte Produktion - Neue Denk- und Lösungsansätze aufgrund verbesserter IuK-Technologie. wt Werkstatttechnik, Jg. 88, Heft 3, S. 87-92, 1998.
- [Wes-98] Westkämper, E., Wiendahl, H. Balve, P.:  
Dezentralisierung und Autonomie in der Produktion. Eine systematische Betrachtung der Klassifizierungsmerkmale, ZWF 93 (1998) 9, S. 407-410
- [Wes-00] Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.:  
Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. In: wt Werkstatttechnik, Jahrgang 90 (2000) H. 1/2, S. 22-26 Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 2000.
- [Wes-02] Westkämper, E.:  
Wandlungsfähigkeit – Herausforderungen und Lösungen im turbulenten Umfeld. In: Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantereiche Serienproduktion. Forschungskolloquium SFB 467, Stuttgart, 16. April 2002.
- [Wes-03] Westkämper, E.; Kirchner, S.; Winkler, R.:  
Unternehmensstudie zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. In: wt Werkstatttechnik, Jahrgang 99 (2003) H. 4, S. 245-260, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf , 2003.
- [Wes-04] Westkämper, E.:  
Hochlauf von Fabriken und Produktionssystemen. Wirtschaftliche Produktion am Standort Deutschland durch wandlungsfähige Organisationsformen. In: 5. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, Tagungsband, 31. März – 1. April 2004, Stuttgart.

- [Wie-00a] Wiendahl, H.-P.; Hernandez, R.:  
Wandlungsfähigkeit - neues Zielfeld in der Fabrikplanung. Industrie Management, Jg. 16, Heft 5, GITO-Verlag, S. 37-41, 2000.
- [Wie-00b] Wiendahl, H.-P.:  
Hochautomatisierung wird in Frage gestellt, Industrie Anzeiger (2000) 30/31, S. 32-33
- [Wie-02] Wiendahl, H.-P.:  
Wandlungsfähigkeit – Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. In: wt Werkstatttechnik, Jahrgang 92 (2002) H. 4, S. 122 – 127, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [Wie-03a] Wiendahl, H.-P.; Heger, H.-P.: Heger, C. L.:  
Justifying Changeability – A Methodical Approach To Achieving Cost Effectiveness. IN: CIRP 2<sup>nd</sup> International Conference on Reconfigurable Manufacturing. Ann Arbor, Michigan, USA, Tagungsband, 20. – 21. August 2003.
- [Wie-03b] Wiendahl, H.P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Löllmann, F., J. H.:  
Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse. In: wt Werkstatttechnik, Jahrgang 93 (2003) H. 4, S. 238 – 243, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [Wie-05] Wiendahl, H.P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F.:  
Planung modularer Fabriken – Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. Hanser Verlag, Wien München. 2005.
- [Wil-88] Wildemann, H.:  
Kundenahe Produktion durch Fertigungssegmentierung, Gtfm, München, 1988
- [Wil-06] Wilke, M.:  
Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 2006.
- [Wir-01a] Wirth, S.:  
Die wandlungsfähige Fabrik, Jahrbuch der Logistik 2000, Verl.-Gruppe Handelsblatt, Düsseldorf, 2001,
- [Wir-01b] Wirth, S.:  
Wandlungsfähige Produktionsfabriken, 18. Deutscher Logistikkongress, 17.-19.10.2001, Berlin



- [Wir-03] Wirth, S.; Erfurth, R.; Olschewski, T.:  
Mobilitätsstufenabhängige Fabrikplattformen – Flexibilisierung von bestehenden Fabrikstrukturen. In: wt Werkstatttechnik, Jahrgang 93 (2003) H. 4, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [Wit-01] Wittekind, W.:  
Flexible Fabriken für die Produktion von Pumpen, 18. Deutscher Logistikkongress, 17.-19.10.2001, Berlin
- [Wit-04] Witte, K.-W.; Vielhaber, W.:  
Neue Konzepte für wandlungsfähige Fabriken und Fabrikparks. Shaker Verlag. Aachen, 2004.
- [Wit-05] Witte, K.-W.; Vielhaber, W.; Ammon, C.:  
Planung und Gestaltung wandlungsfähiger und wirtschaftlicher Fabriken. In: wt Werkstatttechnik, Jahrgang 95 (2005) H. 4, S. 227, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005.
- [Zäh-03] Zäh, M. F.; Cisek, R., Sudhoff, W.; Redelstab, P.:  
Mit Mobilität zu mehr Strukturvariabilität. In: wt Werkstatttechnik, Jahrgang 93 (2003) H. 4, S. 327-331 Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [Zäh-04a] Zäh, M. F.; Bayerer, P. (Hrsg.):  
Gestaltung und Betrieb mobiler Produktionssysteme - Abschlussbericht des Forschungsprojektes ProMotion. München: Utz 2004
- [Zäh-04b] Zäh, M. F.; Sudhoff, W.; Möller, N.; Aull, F.:  
Evaluation of mobile production scenarios based on the Real Option Approach. 4. Chemnitzer Tagung "Vernetzt Planen und Produzieren" (VPP). Chemnitz, 27.-28. September 2004
- [Zäh-05] Zäh, M. F.; Möller, N.; Sudhoff, W.:  
A Framework for the valuation of Changeable Manufacturing Systems. CIRP 3rd Internat. Conference on Reconfigurable Manufacturing. 10.-12. Mai 2005, Ann Arbor (USA).