

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik  
der Technischen Universität München

## **Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme**

**Markus Heinecker**

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

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

**Vorsitzender:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

**Prüfer der Dissertation:** 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. A. Günthner  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart

Die Dissertation wurde am 14.03.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 24.05.2006 angenommen.



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München.

Mein persönlicher Dank geht in erster Linie an Herrn Prof. Dr. W. A. Günthner, der mir ein hohes Maß an Vertrauen entgegenbrachte und mir viele Gestaltungsfreiräume für meine wissenschaftliche Arbeit ließ. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr. G. Reinhart für die Übernahme des Korreferats und Herrn Prof. Dr. M. F. Zäh für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl danke ich ganz herzlich für die gute Zusammenarbeit, die angenehme Arbeitsatmosphäre und die allzeitige Hilfsbereitschaft. Ein großer Dank geht an meinen Kollegen Jürgen Schmalzl und Dr. Andrea Lohner für ihre „Korrekturarbeiten“.

Meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, danke ich für die langjährige Unterstützung in allen Bereichen meines Lebensweges, wodurch es mir ermöglicht wurde, diesen wichtigen Schritt in meinem beruflichen Werdegang abzuschließen.

Durch die große moralische Unterstützung meiner Freundin Doris Lohner konnte ich den Weg zur Vollendung meiner Arbeit stets im Auge behalten. Vielen Dank!

Schrobenhausen, Mai 2006

Markus Heinecker



# Kurzzusammenfassung

## Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme

Markus Heinecker

Heutzutage haben Unternehmen in einem sehr schwierigen Umfeld zu agieren. Zunehmende Verkürzung der Produktlebenszyklen in Verbindung mit einem hohen Innovationsdruck im Bereich der Produktionstechnologien, der Trend zur Fertigung kundenindividueller Produkte und damit gekoppelt eine hohe Variantenvielfalt sind nur einige wenige Herausforderungen für Unternehmen. In der Regel wirken sich Turbulenzen immer direkt auf die Produktion aus. Den Materialflusssystemen, die eine verbindende Funktion innerhalb der Produktion darstellen, kommt bei der Bewältigung dieser Aufgaben eine besondere Bedeutung zu.

Veränderungen in dynamischen Produktionsstrukturen führen in den meisten Fällen direkt zu Veränderungen in den innerbetrieblichen Materialflusssystemen und erfordern wandelbare Materialflusssysteme. Wandelbare Materialflusssysteme müssen dabei die Eigenschaft aufweisen, auf ungeplante und nicht vorgedachte Ereignisse reagieren zu können.

Als Ansatz zur Gestaltung wandelbarer Materialflusssysteme wurde die Methode der Modularisierung gewählt. In der Planungsphase kann das Materialflusssystem genau den Anforderungen hinsichtlich der technischen Daten und der geforderten Mindestflexibilität ausgelegt und aus einzelnen Modulen zusammengesetzt werden. Reicht auf Grund unvorhergesehener Turbulenzen das eingeplante Flexibilitätspotenzial nicht mehr aus, können modular aufgebaute Materialflusssysteme gezielt durch systemeigene oder –fremde Module erweitert werden.



# Summary

## **Method to design and evaluate changeable material flow systems**

Markus Heinecker

Nowadays enterprises have to act in a very difficult environment. Increasing reduction of product life cycles in connection with high pressure on innovation within the range of manufacturing technologies, the trend to the manufacturing of customized products associated with a high variety are only some of the challenges for enterprises. As a general rule such turbulences have a direct effect on production processes. The material flow system, which describes a connecting function within production, has a particular importance to perform these tasks.

Changes in dynamic production processes causes in most cases directly to changes in in-plant material flow systems and require changeable material flow systems. Changeable material flow systems have to feature the characteristics to react to unplanned and not assumed events.

As fundamental idea was the method of modularity selected for designing changeable material flow systems. During the planning process the material flow systems can be dimensioned for the requirements regarding to the technical data and the demanded minimum flexibility and built up from individual modules. If the planned amount of flexibility is insufficient to unexpected turbulences, it is possible that modular structured material flow systems can be extended by own system or non-system modules.



# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b> .....                                   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Ausgangssituation und Problemstellung .....               | 1         |
| 1.2      | Zielsetzung und Vorgehensweise .....                      | 2         |
| <b>2</b> | <b>Materialflusssysteme - Grundlagen</b> .....            | <b>5</b>  |
| 2.1      | Systemansatz.....   | 5         |
| 2.2      | Materialflusssysteme – Einteilung und Eigenschaften ..... | 9         |
| 2.2.1    | Physische Materialflussebenen .....                       | 11        |
| 2.2.2    | Funktionen eines Materialflusssystems .....               | 12        |
| 2.2.2.1  | Funktion Fördern .....                                    | 13        |
| 2.2.2.2  | Funktion Lagern.....                                      | 19        |
| 2.2.2.3  | Funktion Handhaben .....                                  | 22        |
| <b>3</b> | <b>Planung von Materialflusssystemen</b> .....            | <b>25</b> |
| 3.1      | Planungsbegriff .....                                     | 25        |
| 3.2      | Ablauf der Materialflussplanung.....                      | 26        |
| 3.2.1    | Vorarbeiten .....   | 28        |
| 3.2.2    | Grobplanung.....  | 32        |
| 3.2.2.1  | Strukturplanung .....                                     | 33        |
| 3.2.2.2  | Systemplanung.....  | 36        |
| 3.2.3    | Feinplanung.....  | 39        |
| 3.2.4    | Realisierung.....   | 40        |
| <b>4</b> | <b>Wandelbare Fabrikstrukturen</b> .....                  | <b>41</b> |
| 4.1      | Veränderungen der Rahmenbedingungen .....                 | 41        |
| 4.1.1    | Externe Unternehmenseinflüsse.....                        | 41        |
| 4.1.2    | Interne Unternehmenseinflüsse.....                        | 44        |
| 4.1.3    | Zeitliche Einteilung.....                                 | 44        |
| 4.2      | Anforderungen an zukünftige Fabrikstrukturen .....        | 46        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.2.1    | Flexibilität.....  | 46         |
| 4.2.2    | Wandlungsfähigkeit und Wandelbarkeit .....   | 50         |
| 4.2.3    | Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....  | 54         |
| 4.3      | Zusammenfassung.....   | 58         |
| <b>5</b> | <b>Wandelbare Materialflusssysteme .....</b>   | <b>61</b>  |
| 5.1      | Beurteilung der Wandelbarkeit von Materialflusssystemen.....                                       | 61         |
| 5.1.1    | Flexible Materialflusssysteme .....  | 61         |
| 5.1.2    | Wandelbare Materialflusssysteme.....   | 68         |
| 5.2      | Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen am Beispiel der<br>Funktion „Transportieren“ ..... | 73         |
| 5.2.1    | Layoutflexibilität .....   | 73         |
| 5.2.2    | Durchsatzflexibilität.....   | 76         |
| 5.2.3    | Fördergutflexibilität .....  | 80         |
| 5.2.4    | Wandelbarkeitspotenzial .....  | 84         |
| 5.3      | Zusammenfassung.....   | 91         |
| <b>6</b> | <b>Modulare Materialflusssysteme.....</b>  | <b>93</b>  |
| 6.1      | Modulare Fabrikstrukturen .....  | 93         |
| 6.1.1    | Allgemeine Moduldefinition.....  | 94         |
| 6.1.2    | Ansätze zur Modularisierung von Fabrikstrukturen.....  | 96         |
| 6.2      | Funktionsorientierte Modularisierung .....   | 104        |
| 6.2.1    | Allgemeiner Ansatz.....  | 104        |
| 6.2.2    | Hierarchieebenenmodell.....  | 107        |
| 6.2.3    | Methodik der Modularisierung .....   | 111        |
| 6.2.3.1  | Subsystem .....  | 111        |
| 6.2.3.2  | Struktur der Technikmodule.....  | 113        |
| 6.3      | Zusammenspiel Modularisierung und Wandelbarkeit .....  | 118        |
| 6.4      | Modularisierung am Beispiel einer Elektrohängebahn/Hängekransystem                                 | 121        |
| 6.5      | Zusammenfassung.....   | 126        |
| <b>7</b> | <b>Standardisierte Modulbeschreibung.....</b>  | <b>129</b> |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 7.1      | Aufbau der Modulbeschreibung am Beispiel<br>der Funktion „Transportieren“ ..... | 129        |
| 7.1.1    | Modulbeschreibung für Technikmodule .....                                       | 130        |
| 7.1.2    | Modulbeschreibung für Subsysteme .....  | 138        |
| 7.2      | Datensprache der Modulbeschreibung .....  | 138        |
| 7.3      | Zusammenfassung.....  | 138        |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>  | <b>138</b> |
| <b>9</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>   | <b>138</b> |



# Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1-1: Vorgehensweise und methodischer Aufbau der Arbeit zur Konzeption von modularen Materialflusssystemen ..... | 4  |
| Abbildung 2-1: Ein allgemeines System (nach [Rop-99]) .....   | 5  |
| Abbildung 2-2: Die Fabrik als hierarchisches System betrachtet [Wie-05] .....   | 6  |
| Abbildung 2-3: Systemkonzepte (nach [Rop-99]) .....   | 7  |
| Abbildung 2-4: Zusammenspiel der Systemkonzepte .....   | 8  |
| Abbildung 2-5: Arten von Systemveränderungen .....  | 9  |
| Abbildung 2-6: Begriffsabgrenzungen in der Logistik [Gün-06b] .....   | 10 |
| Abbildung 2-7: Ordnungssystem des Materialflusses (nach [Ble-99]) .....   | 12 |
| Abbildung 2-8: Funktionen des Materialflusssystem.....  | 13 |
| Abbildung 2-9: Bestandteile eines Transportsystems (nach [Rei-05]) .....  | 14 |
| Abbildung 2-10: Modulmaße für die Systeme ISO- und Euro-Palette (nach [DIN-15155]) .....                                  | 15 |
| Abbildung 2-11: Einteilung der Transportmittel [Gün-06b].....   | 18 |
| Abbildung 2-12: Auswahlkriterien für Transportsysteme (nach [Rei-05]).....  | 19 |
| Abbildung 2-13: Subsysteme des Lagers mit Auswahlkriterien (nach [Gün-06b]) ...   | 21 |
| Abbildung 2-14: Teilfunktionen des Handhabens mit entsprechenden Elementarfunktionen [VDI-2860] .....                     | 22 |
| Abbildung 3-1: Hauptphasen einer Materialflussplanung (nach [Gün-05a]) .....  | 27 |
| Abbildung 3-2: Teilphasen einer Grobplanung mit den entsprechenden Tätigkeiten (nach [Gün-03a]).....                      | 32 |
| Abbildung 3-3: Vorgehensweise und verwendete Methoden bei der Strukturplanung .....                                       | 34 |
| Abbildung 3-4: Vorgehensweise und verwendete Methoden bei der Systemplanung.....  | 37 |
| Abbildung 4-1: Fabrik im Spannungsfeld externer und interner Einflüsse .....  | 41 |

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 4-2:  | „Top 10“ der Turbulenzursachen nach ihrem Auftreten im Unternehmen (nach [Wes-03]) .....                                     | 46 |
| Abbildung 4-3:  | Zusammenspiel Basisflexibilität und erweiterte Flexibilität .....  | 50 |
| Abbildung 4-4:  | Ansatz zur Abschätzung der notwendigen Wandlungsfähigkeit [Rei-00] .....   | 51 |
| Abbildung 4-5:  | Zusammenhang Wandlungsfähigkeit – Wandelbarkeit [Wes-00]..   | 52 |
| Abbildung 4-6:  | Zusammenspiel Flexibilität und Wandelbarkeit .....   | 54 |
| Abbildung 4-7:  | Nutzen der Wandlungsfähigkeit (nach [Sch-04a]) .....   | 55 |
| Abbildung 4-8:  | Kostenarten und –vergleich wandlungsfähiger Systeme (nach [Nyh-04a]).....  | 57 |
| Abbildung 5-1:  | Untergliederung der Flexibilitätsziele [Hal-99] .....  | 63 |
| Abbildung 5-2:  | Flexibilitätsanforderungen an Materialflusssysteme nach [Han-01] .....   | 66 |
| Abbildung 5-3:  | Darstellung der Flexibilität .....   | 67 |
| Abbildung 5-4:  | Anpassung der Flexibilität durch Erweiterung .....   | 70 |
| Abbildung 5-5:  | Anpassung der Flexibilität durch Integrationsfähigkeit .....   | 71 |
| Abbildung 5-6:  | Vergleich Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit in Bezug auf Erhöhung der Fördergutflexibilität.....               | 72 |
| Abbildung 5-7:  | Flächenmäßige Betrachtung der Layoutflexibilität.....  | 74 |
| Abbildung 5-8:  | Höhenmäßige Betrachtung der Layoutflexibilität .....   | 75 |
| Abbildung 5-9:  | Durchsatzflexibilität unter Berücksichtigung der Materialflussrichtung („Richtungsabhängigkeit“).....                        | 77 |
| Abbildung 5-10: | Einteilung der Ladehilfsmittel nach Abmaße und Gewicht am Beispiel geschlossener Behälter .....                              | 81 |
| Abbildung 5-11: | Kriterien bei der Bewertung der Flexibilität des Greifbildes .....   | 82 |
| Abbildung 5-12: | Ausführungsbeispiele für die Kategorisierung der Flexibilität des Greifbildes in Anlehnung an Fälle aus Abbildung 5-11 ..... | 83 |
| Abbildung 5-13: | Vorgehensweise bei der Potenzialabschätzung von wandelbaren Materialflusssystemen .....                                      | 85 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 5-14: Abschätzung des Wandelbarkeitspotenzials bei einer Rollenbahn und einer Elektrohängebahn .....            | 87  |
| Abbildung 5-15: Graphische Darstellung des Wandelbarkeitspotenzials bei einer Rollenbahn und einer Elektrohängebahn ..... | 88  |
| Abbildung 5-16: Graphische Darstellung des ermittelten Wandelbarkeitspotenzial für ausgewählte Transportmittel .....      | 90  |
| Abbildung 6-1: Moderne Organisationskonzepte und deren Charakteristika (nach [Wes-98b]).....                              | 93  |
| Abbildung 6-2: Allgemeine Eigenschaften und Beschreibungsmerkmale eines Moduls [Hil-05].....                              | 96  |
| Abbildung 6-3: Hierarchie-Ebenenmodell einer modularen Fabrik (nach [Wie-05]).....  | 99  |
| Abbildung 6-4: Entstehung von Wandlungsbausteinen .....   | 102 |
| Abbildung 6-5: Zusammenhang zwischen Modularität sowie physischer und funktionaler Abhängigkeit (nach [Koh-97]) .....     | 105 |
| Abbildung 6-6: Einordnung der Funktionen im Hierarchieebenenmodell eines Materialflusssysteme .....                       | 107 |
| Abbildung 6-7: Vorgehensweise bei der Bildung von lokalen Kennwerten .....  | 108 |
| Abbildung 6-8: Funktionsorientierte Modularisierung eines Materialflusssysteme.....                                       | 112 |
| Abbildung 6-9: Technikmodule der Funktion „Transportieren“ .....  | 116 |
| Abbildung 6-10: Technikmodule der Funktion „Lagern“ .....   | 117 |
| Abbildung 6-11: Technikmodule der Funktion „Handhaben“ .....  | 118 |
| Abbildung 6-12: Möglichkeit einer Flexibilitätserhöhung durch modulare Materialflusssysteme .....                         | 119 |
| Abbildung 6-13: Versuchsanlage am Lehrstuhl fml .....   | 121 |
| Abbildung 6-14: Transportmittel inkl. Lastaufnahmemittel.....   | 124 |
| Abbildung 6-15: Ausführungsbeispiele von Übergabeplätzen .....  | 126 |
| Abbildung 7-1: Aufbau und Struktur der Modulbeschreibung für ein Technikmodul .....                                       | 130 |

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| Abbildung 7-2:  | Datenstruktur für den Überpunkt „Allgemeine Daten“ .....  | 131 |
| Abbildung 7-3:  | Datenstruktur für den Überpunkt „Funktionsbeschreibung“ .....   | 132 |
| Abbildung 7-4:  | Datenstruktur für den Überpunkt „Technische Daten“ .....  | 134 |
| Abbildung 7-5:  | Datenstruktur für den Überpunkt „Flexibilität“ .....  | 135 |
| Abbildung 7-6:  | Datenstruktur für den Überpunkt „Kosten“ .....  | 137 |
| Abbildung 7-7:  | Datenstruktur für den Überpunkt „Status“ .....  | 138 |
| Abbildung 7-8:  | Datenstruktur für den Überpunkt „Modulschnittstelle“ .....  | 138 |
| Abbildung 7-9:  | Datenstruktur der Beschreibung eines Subsystems.....  | 138 |
| Abbildung 7-10: | Datenstruktur eines Subsystems<br>für den Überpunkt „Allgemeine Daten“ und „Funktion“ .....                   | 138 |
| Abbildung 7-11: | Datenstruktur eines Subsystems<br>für den Überpunkt „Standortdaten“ .....                                     | 138 |
| Abbildung 7-12: | Datenstruktur eines Subsystems<br>für den Überpunkt „Technische Daten“ .....                                  | 138 |
| Abbildung 7-13: | Berechnungsvorschriften zur Bestimmung<br>der Gesamtverfügbarkeit .....                                       | 138 |
| Abbildung 7-14: | Vorgehensweise bei der Bestimmung der Verfügbarkeit<br>komplexer Systeme .....                                | 138 |
| Abbildung 7-15: | Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Flexibilität“   | 138 |
| Abbildung 7-16: | Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Kosten“ .....   | 138 |
| Abbildung 7-17: | Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Status“ .....   | 138 |
| Abbildung 7-18: | Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt<br>„Bereichsschnittstelle“ .....                             | 138 |
| Abbildung 7-19: | Datenstruktur eines Subsystems<br>für den Überpunkt „Ressourcen“ .....  | 138 |
| Abbildung 7-20: | Ausführung einer Modulbeschreibung am Beispiel<br>„Übergabepplatz“ unter Verwendung der Datensprache XML..... | 138 |

# Tabellenverzeichnis

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Tabelle 2-1:  | Einteilung der Ladehilfsmittel nach Tragfähigkeit .....  | 16  |
| Tabelle 3-1:  | Überblick über die bei einer Ist-Analyse zu berücksichtigen Daten<br>(nach [Arn-03]).....                                    | 31  |
| Tabelle 4-1:  | Kostenarten bei wandlungsfähigen Systemen (nach [Nyh-04a])...  | 56  |
| Tabelle 5-1:  | Flexibilitätsarten nach [Refa-90] .....  | 61  |
| Tabelle 5-2:  | Flexibilitätsarten nach [Tem-93] .....   | 62  |
| Tabelle 5-3:  | Einfluss der Fördermittel auf die Flexibilität .....   | 64  |
| Tabelle 5-4:  | Einfluss der Lagertechnik auf die Flexibilität.....  | 65  |
| Tabelle 5-5:  | Einfluss der Lagerbediengeräte auf die Flexibilität .....  | 65  |
| Tabelle 5-6:  | Anforderungen an ein flexibles Materialflusssystem.....  | 67  |
| Tabelle 5-7:  | Kategorisierung wichtiger Transportmittel hinsichtlich<br>Layoutflexibilität .....   | 76  |
| Tabelle 5-8:  | Kategorisierung wichtiger Transportmittel hinsichtlich<br>„Richtungsabhängigkeit“ .....                                      | 78  |
| Tabelle 5-9:  | Kriterien zur Erhöhung der Durchsatzflexibilität.....  | 79  |
| Tabelle 5-10: | Anforderungen an wandelbare Materialflusssysteme am Beispiel<br>Transportieren mit Einfluss auf die Flexibilitätsarten ..... | 86  |
| Tabelle 5-11: | Wandelbarkeitspotenzial für ausgewählte Transportmittel .....  | 89  |
| Tabelle 6-1:  | Gestaltungsbereiche mit den entsprechenden Fabrikelementen<br>einer modulare Fabrikstruktur (nach [Wie-03b]) .....           | 98  |
| Tabelle 6-2:  | Wandlungsbefähiger (nach [Her-03]) .....   | 101 |
| Tabelle 6-3:  | Kriterien für eine funktionsorientierte Modularisierung<br>(nach [Wil-06]) .....   | 106 |
| Tabelle 6-4:  | Übersicht über wichtige lokale Kennwerte in Bezug<br>auf die Funktion „Transportieren“ .....                                 | 110 |
| Tabelle 6-5:  | Charakteristik und Eigenschaften eines Subsystems.....   | 113 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| Tabelle 6-6:  | Charakteristik und Eigenschaften eines Technikmoduls .....   | 115 |
| Tabelle 6-7:  | Einfluss der Technikmodule der Funktion „Transportieren“<br>auf die Flexibilitätsarten Layout, Durchsatz und Fördergut ..... | 120 |
| Tabelle 6-8:  | Technikmodule für das Subsystem Elektrohängebahn .....   | 122 |
| Tabelle 6-9:  | Technikmodule für das Subsystem Hängekransystem.....   | 123 |
| Tabelle 6-10: | Eigenschaften des Technikmoduls Übergabepplatz.....  | 125 |
| Tabelle 7-1:  | Zusammenhang Technikmodul und Flexibilitätsart .....   | 136 |

# 1 Einführung

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Schlagworte wie Flexibilisierung und Globalisierung sind mittlerweile nicht mehr der wissenschaftlichen Literatur vorbehalten, sondern haben sich zu wichtigen Themen im gesellschaftlichen Diskurs entwickelt. Tatsächlich müssen sich Unternehmen heute einem Wettbewerb stellen, der sich in einer vergleichsweise kurzen Zeitspanne radikal verändert hat. Die rasante Entwicklung der Informationstechnik ermöglichte ein Voranschreiten der Globalisierung, das bis vor kurzem undenkbar erschien. Genügte es früher, mit einer begrenzten Anzahl meist regionaler Mitbewerber zu konkurrieren, sehen sich die Unternehmen nun einem weltweiten Konkurrenzkampf ausgesetzt.

Die Folge der größeren Anzahl von Anbietern ist nicht nur ein stark erhöhter Preisdruck, sondern auch ein Wandel vom Anbieter- zum Käufermarkt, der tief greifende Änderungen im Käuferverhalten auslöst. Das oft unberechenbare Verhalten der Kunden stellt eine enorme Herausforderung für produzierende Unternehmen dar. So können ein Rückgang der Markentreue bei gleichzeitig steigenden Ansprüchen an Lieferzeit, Qualität, technische Funktionalität und den Preis von Produkten beobachtet werden. Zusätzlich verlangt der Kunde nach mehr als nur aus einer vorgegebenen Variantenauswahl sein Produkt auszuwählen. Er möchte seine Wünsche optimal erfüllt wissen und legt Wert auf die Individualität seiner Anschaffung.

Dieses turbulente Unternehmensumfeld erfordert gerade in Hochlohnstandorten wie Deutschland, sich dem Wandel mit neuen Strategien zu stellen. Die Fähigkeit, sich schnell verändernden Marktbedürfnissen anpassen zu können, ist für Unternehmen mit einer am Kunden orientierten Produktion häufig ein zentrales Erfolgskriterium. Eine verstärkte Flexibilisierung und Erhöhung der Wandlungsfähigkeit nicht nur der Fabrikstruktur, sondern auch der Organisation und ihrer Prozesse ist dabei unumgänglich [Wir-03].

Turbulenzen wirken sich in der Regel immer direkt auf die Produktion aus. Die Integration neuer, innovativer Produktionseinrichtungen, die Änderung der Produktionsabläufe oder die Einführung komplett neuer Produkte sind nur einige wenige Beispiele,

auf die sich Unternehmen einstellen müssen. Den Materialflusssystemen, die eine verbindende Funktion innerhalb der Fabrikstruktur darstellen, kommt bei der Bewältigung dieser Aufgaben eine besondere Bedeutung zu.

Heute werden Materialflusssysteme in den meisten Fällen auf einen bestimmten Anwendungsfall ausgelegt und weisen ein festes Flexibilitätspotenzial auf. Auf Veränderungen kann das System nur im Rahmen der vorher geplanten und gedachten Dimensionen reagieren. Ungeplante Ereignisse können nur mit erheblichem Aufwand in dem bestehenden System umgesetzt werden. Zukünftig müssen Materialflusssysteme in der Lage sein, sich ohne großen technischen Aufwand an die neuen, nicht geplanten Anforderungen anpassen zu können. Da es unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll ist ein Materialflusssystem so zu gestalten, dass es auf jegliche Art von ungeplanten Veränderungen reagieren kann, muss die Möglichkeit einer nachträglichen Veränderung und Erweiterung des ursprünglichen Systems bestehen. Dieser zusätzlichen Anforderung an Materialflusssysteme soll mit einer modularisierten Betrachtungsweise begegnet werden.

Die Hersteller von technischen Logistiksystemen sehen in der Modularisierung ihrer materialflusstechnischen Komponenten einen möglichen Lösungsansatz auf dem Weg hin zu wandelbaren Materialflusssystemen. Ein Materialflusssystem kann je nach Bedarf und je nach Anwendungsfall aus verschiedenen Modulen zusammengestellt werden. Die Funktionalität und die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems ergeben sich aus den Potenzialen der Einzelmodule. Wird eine über den ursprünglichen Planungsstand höhere Anpassungsfähigkeit gefordert, besteht so die Möglichkeit, das Potenzial des Systems gezielt durch einzelne Module zur erweitern. Natürlich besitzt der modulare Aufbau auch die Eigenschaft, die Leistungsfähigkeit des Materialflusssystem durch die Wegnahme einzelner Bestandteile zu reduzieren. Somit ist immer ein wirtschaftlich optimaler Betrieb des Systems gewährleistet.

### **1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise**

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme. Wandelbare Materialflusssysteme müssen dabei die Eigenschaft aufweisen, auf ungeplante und nicht vorgedachte 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.

Die Vorgehensweise dieser Arbeit zur Bewertung und Gestaltung modularer Materialflusssysteme gliedert sich in drei große Abschnitte. Unter der Rubrik Grundlagen wird der Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit, die Materialflusssysteme, näher analysiert und die verschiedenen physischen Funktionen dargelegt. Darüber hinaus wird die Vorgehensweise bei einer Planung von Materialflusssystemen beschrieben, welche Daten zur Planung notwendig sind und in welchen Bereich der Planung der Modularisierungsansatz zur Geltung kommt.

Aufbauend auf den Grundlagen werden in der nächsten großen Rubrik die Anforderungen an wandelbare Materialflusssysteme erarbeitet. Ausgehend von der allgemeinen Definition von Flexibilität und Wandelbarkeit erfolgt eine Übertragung und Anwendung der Ergebnisse auf den Bereich der Materialflusssysteme. Ziel dieses Abschnittes ist die konkrete Bewertung und Einteilung von Materialflusssystemen hinsichtlich Flexibilität und Wandelbarkeit.

In der letzten großen Rubrik wird als Lösungsansatz die Modularisierung zur Gestaltung wandelbarer Materialflusssystemen erarbeitet. Aufbauend auf den erarbeiteten Grundlagen und Anforderungen erfolgt eine Modularisierung nach dem Ansatz der funktionsorientierten Modularisierung. Um diese Modularisierung für die Planung und Steuerung von Materialflusssystemen nutzbar zu machen, schließt die Arbeit mit einer Standardisierung der Modulbeschreibung ab.

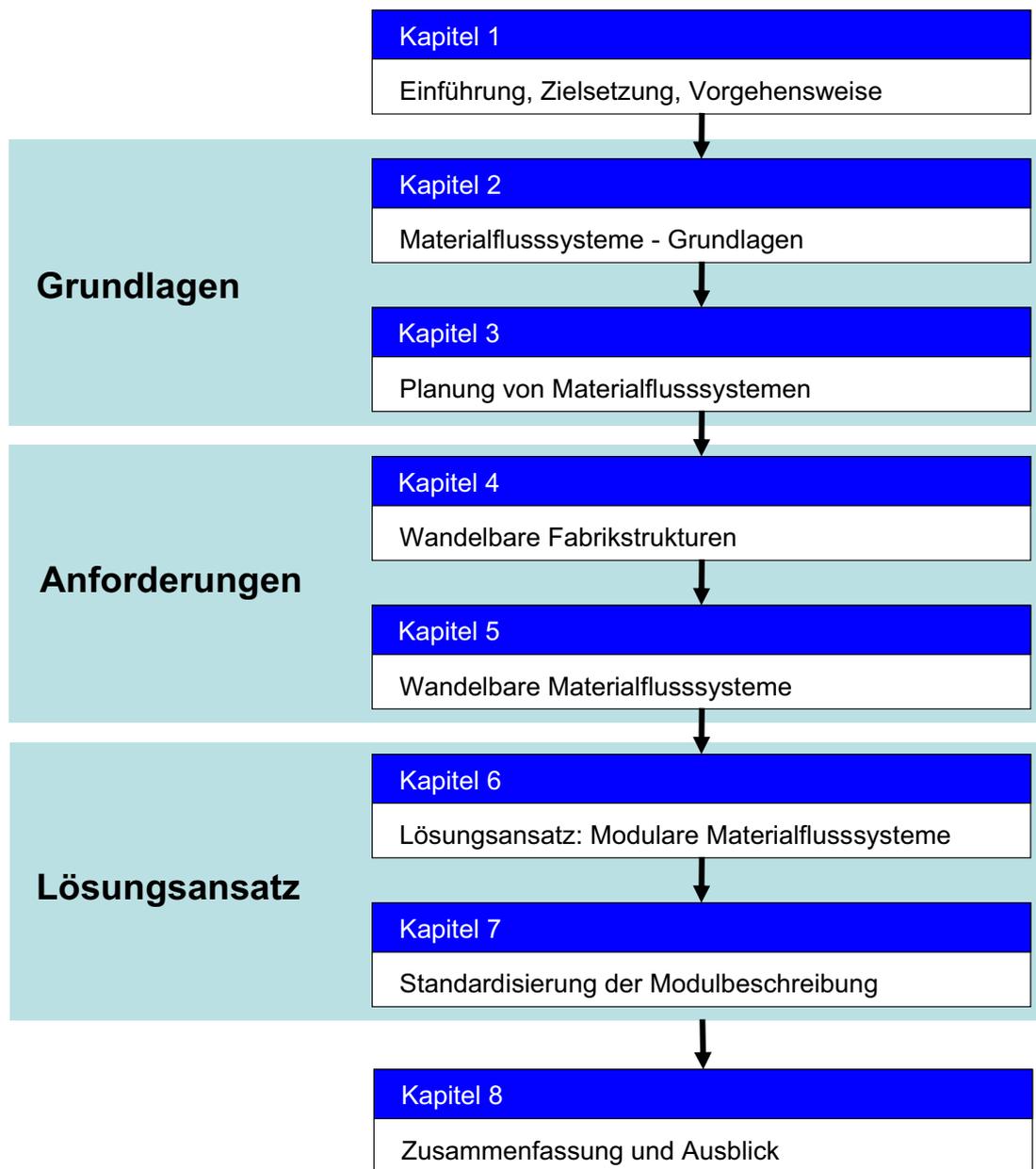


Abbildung 1-1: Vorgehensweise und methodischer Aufbau der Arbeit zur Konzeption von modularen Materialflusssystemen

## 2 Materialflusssysteme - Grundlagen

### 2.1 Systemansatz

Vor der Ableitung der Methode zur Modularisierung von Materialflusssystemen ist es hilfreich, den Modularisierungsgegenstand 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].

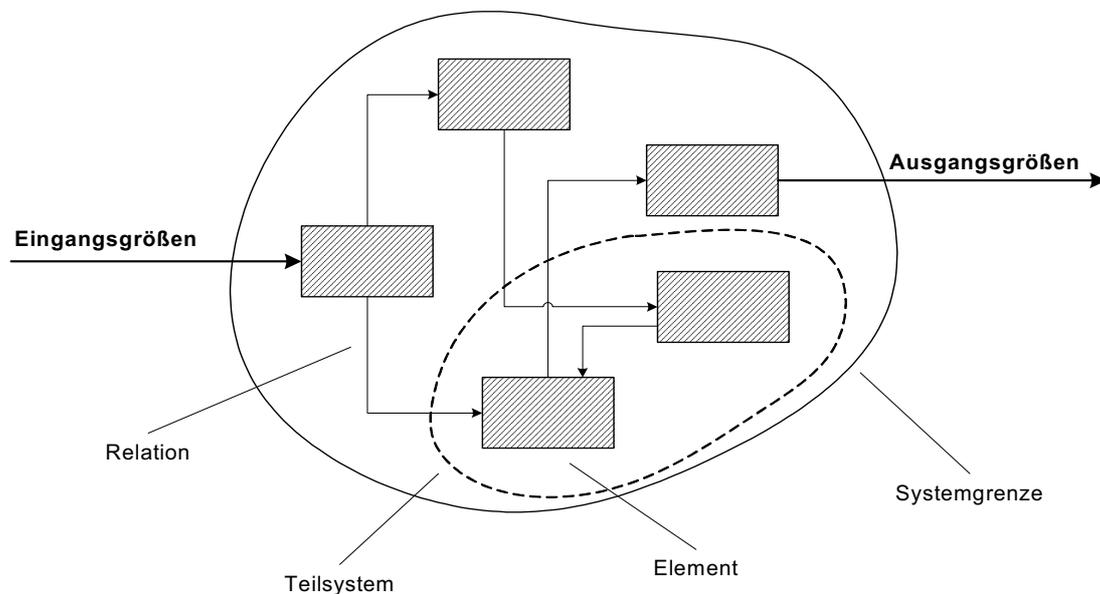


Abbildung 2-1: Ein allgemeines System (nach [Rop-99])

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 2-1). 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 Fähig-

keit, 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 2-2 dargestellt ist.

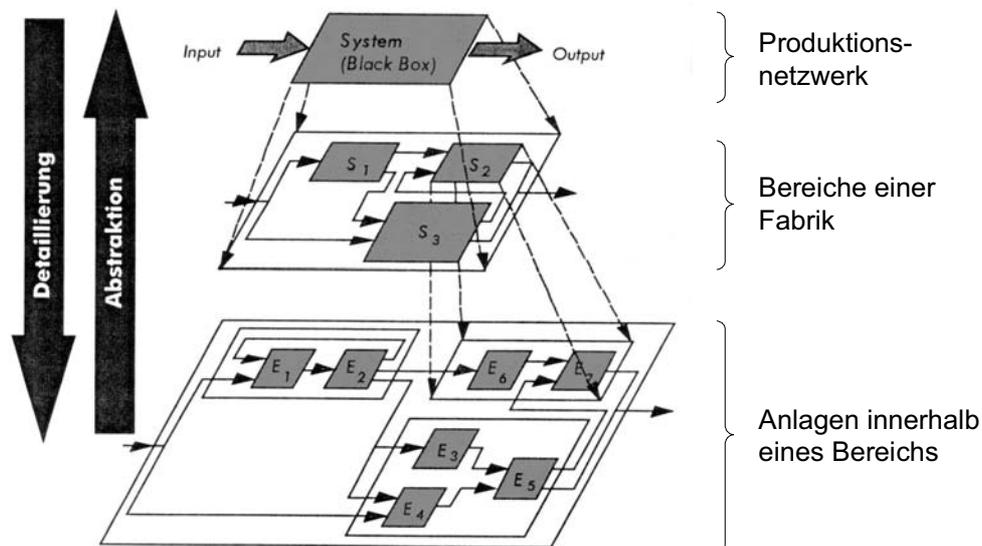


Abbildung 2-2: Die Fabrik als hierarchisches System betrachtet [Wie-05]

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

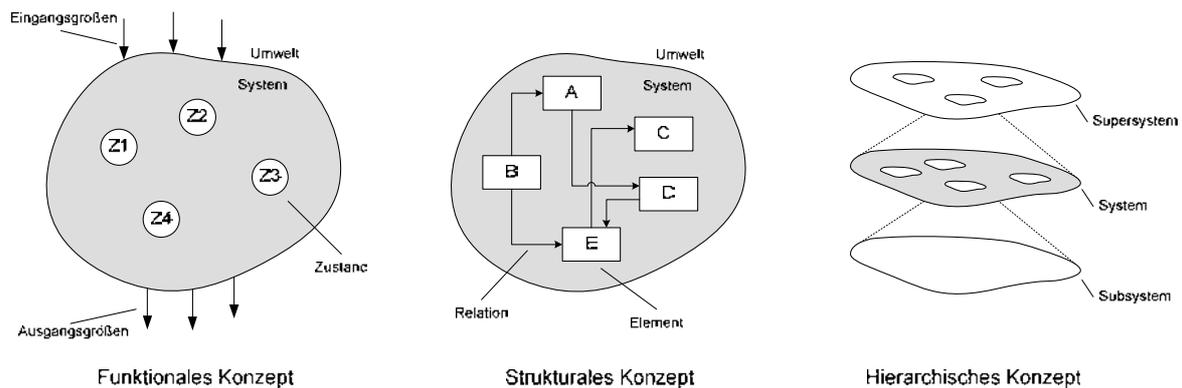


Abbildung 2-3: Systemkonzepte (nach [Rop-99])

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.

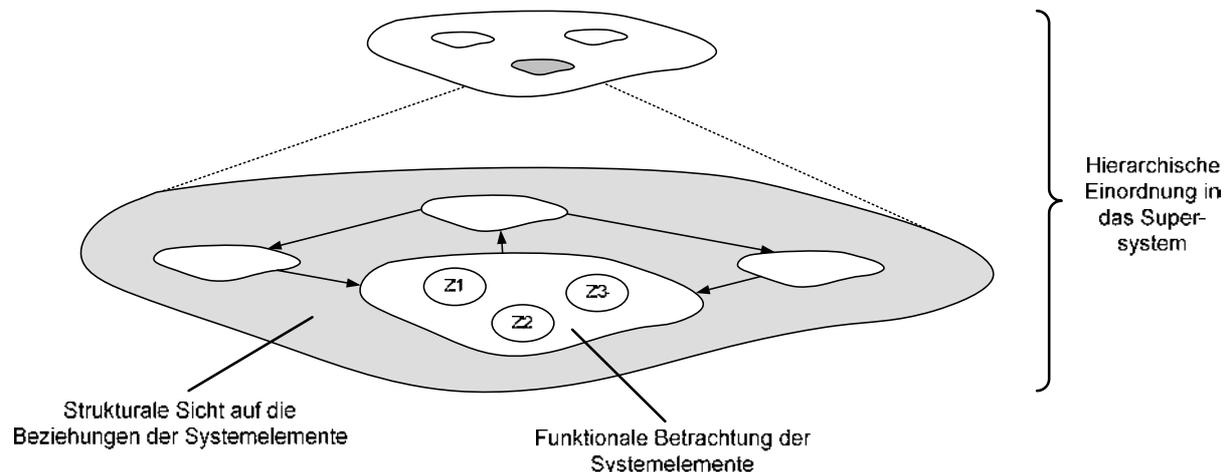


Abbildung 2-4: Zusammenspiel der Systemkonzepte

Abbildung 2-4 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 2-5 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.

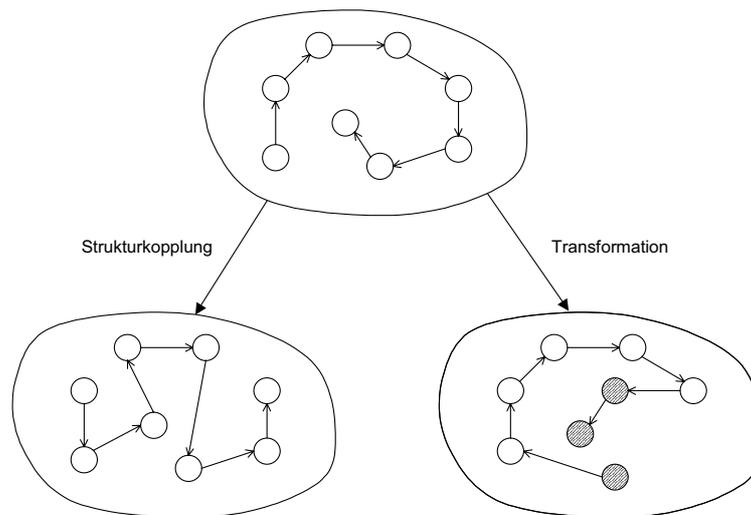


Abbildung 2-5: Arten von Systemveränderungen

Induziert werden kann die Veränderung durch interne oder externe Auslöser. Interne Auslöser werden durch das eigene Verhalten beziehungsweise eigene Veränderungen verursacht (siehe Kapitel 4.1.2). Im Falle der Fabrik kann das zum Beispiel die Änderung der Unternehmensziele sein. Externe Auslöser werden vom Unternehmensumfeld induziert. Probleme mit Zulieferern und eine starke Änderung der Nachfragemenge stellen dabei die häufigsten Ursachen dar (siehe Kapitel 4.1.1).

## 2.2 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 Verfü-

gung 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 2-6).

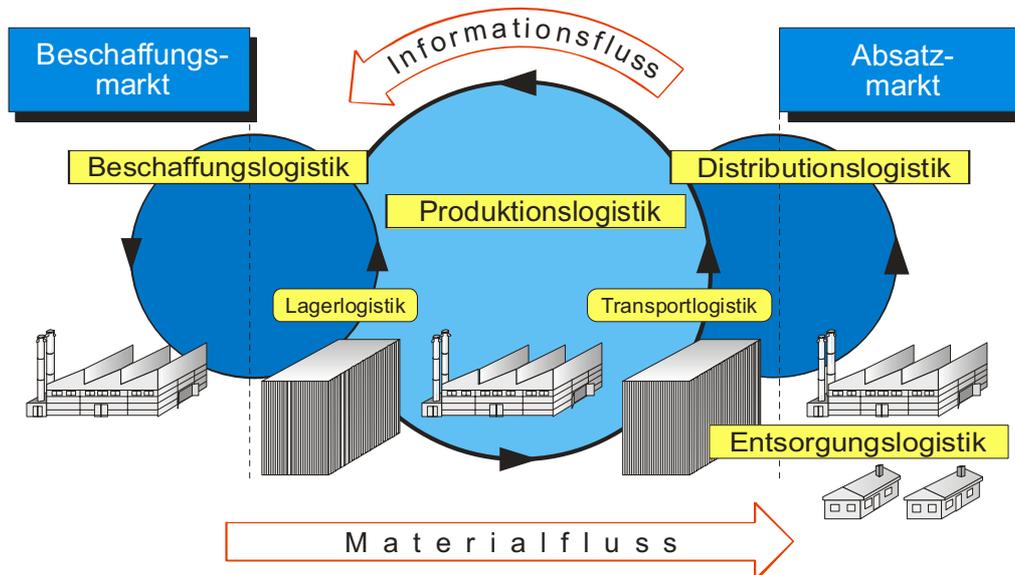


Abbildung 2-6: Begriffsabgrenzungen in der Logistik [Gün-06b]

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.

### 2.2.1 Physische Materialflussebenen

Der physische Materialfluss kann in folgende 4 Stufen hierarchisch kategorisiert werden (vgl. Abbildung 2-7) [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.

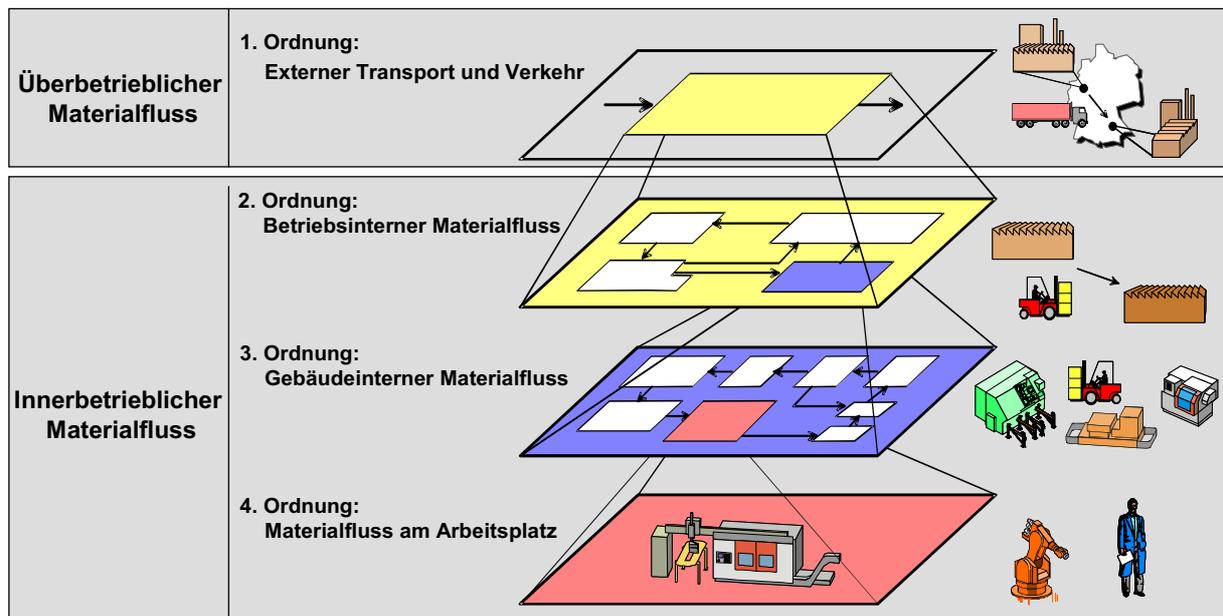


Abbildung 2-7: Ordnungssystem des Materialflusses (nach [Ble-99])

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.

### 2.2.2 Funktionen eines Materialflusssystems

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.

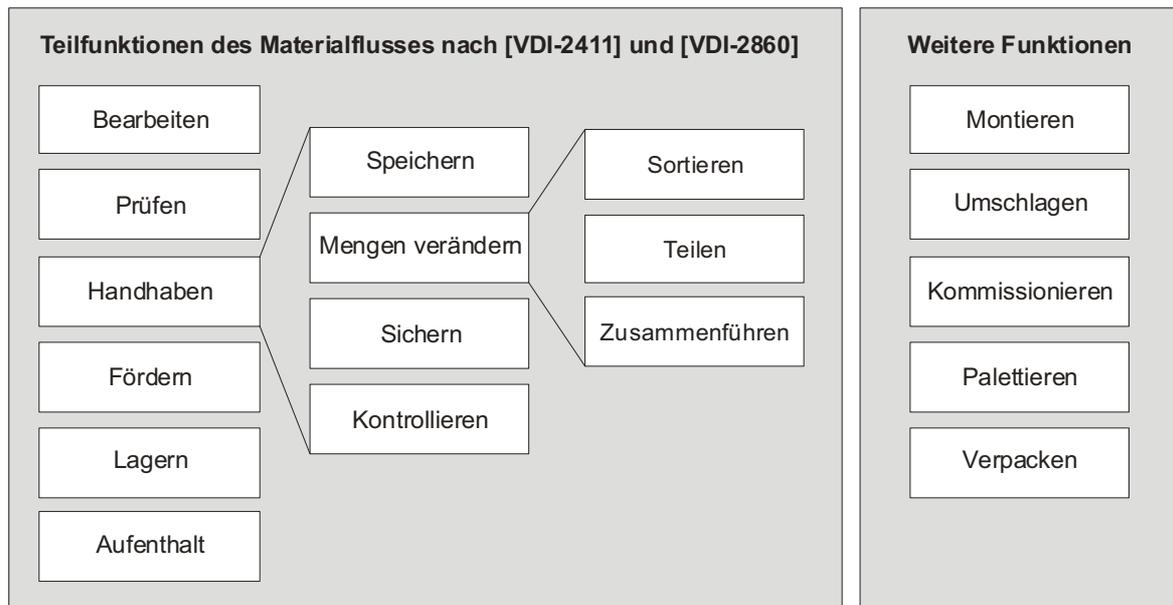


Abbildung 2-8: Funktionen des Materialflusssystemes

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 2-8 dargestellten Funktionen eines Materialflusssystemes lassen sich in der Regel aus den drei genannten Hauptfunktionen zusammensetzen.

### 2.2.2.1 Funktion Fördern

Eine der wichtigsten Aufgaben innerhalb eines Materialflusssystemes ist das Fördern bzw. Transportieren. Ein Transportsystem lässt sich aus drei Komponenten aufbauen (vgl. Abbildung 2-9). 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.

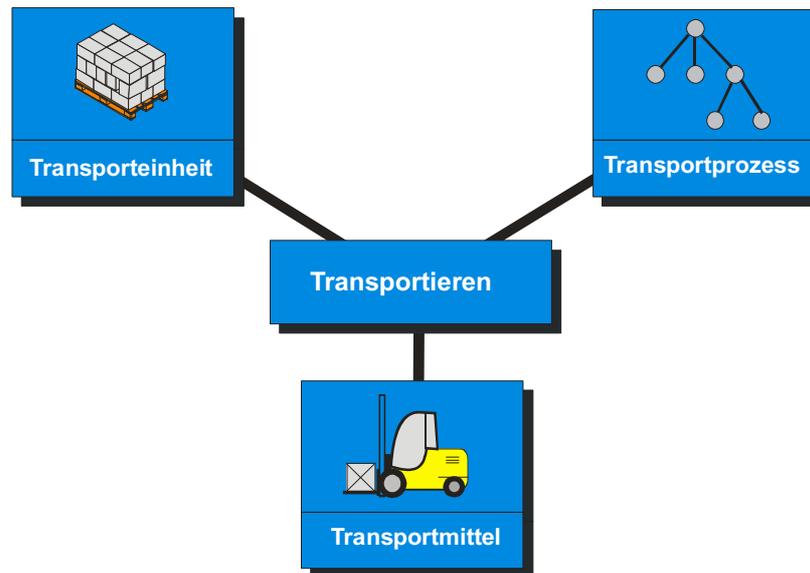


Abbildung 2-9: Bestandteile eines Transportsystems (nach [Rei-05])

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 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

- 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 2-10 die Modulmaße anhand der Bildung von Transporteinheiten dargestellt.

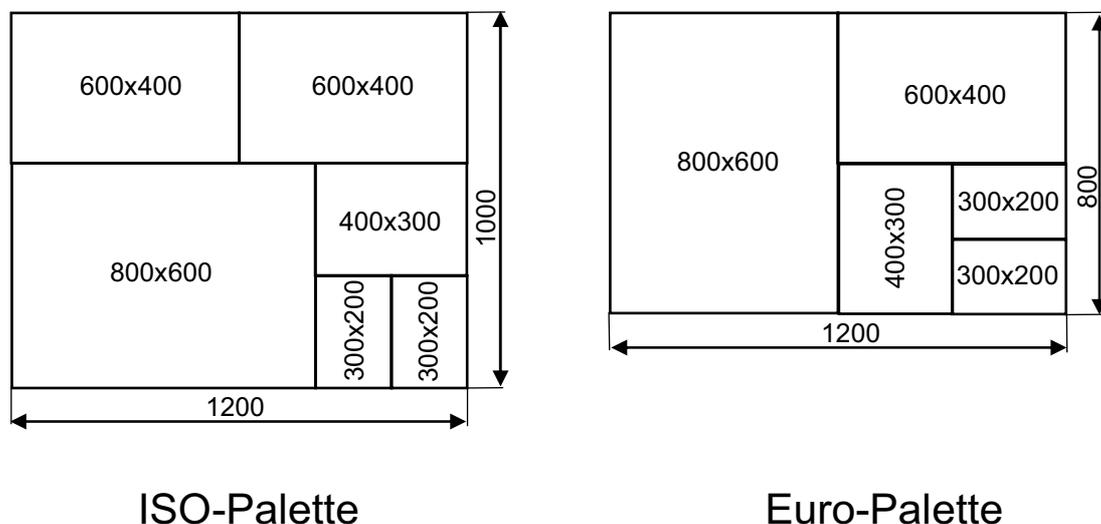


Abbildung 2-10: Modulmaße für die Systeme ISO- und Euro-Palette  
(nach [DIN-15155])

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 2-1). Kleinladungsträger werden demnach bis 50 kg Tragfähigkeit 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<br>600 x 400 mm<br>400 x 300 mm<br>300 x 200 mm          | 1200 x 1000 mm<br>1200 x 800 mm<br>1000 x 800 mm<br>800 x 600 mm |
| Offene Ladungsträger     | Tablare   | Zwei- und Vierwege-<br>Flachpaletten<br><br>Rungenpaletten       |
| Geschlossene Behälter    | Kommissionierkästen<br><br>Lagerbehälter<br><br>Materialflussbehälter | Gitterboxen<br><br>Paloxen                                       |

Tabelle 2-1: 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 2-10).

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].

Auf dem Gebiet der Ladehilfsmittel haben sich einheitliche Modulmaße durchgesetzt, die einen durchgängigen und überbetrieblichen Behälterverkehr ermöglichen. Für die weitere Gestaltung der Transportmittel gilt es diese Normierung aufzugreifen und insbesondere die Lastaufnahmemittel so zu gestalten, dass diese hinsichtlich der Aufnahme von Ladehilfsmitteln unterschiedlicher Modulmaße flexibel sind.

### **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 kon-

## 2 Materialflusssysteme - Grundlagen

struktiven Aufbau bzw. auf die Übertragungsform der notwendigen Energie zum Vortrieb des Fördergutes.

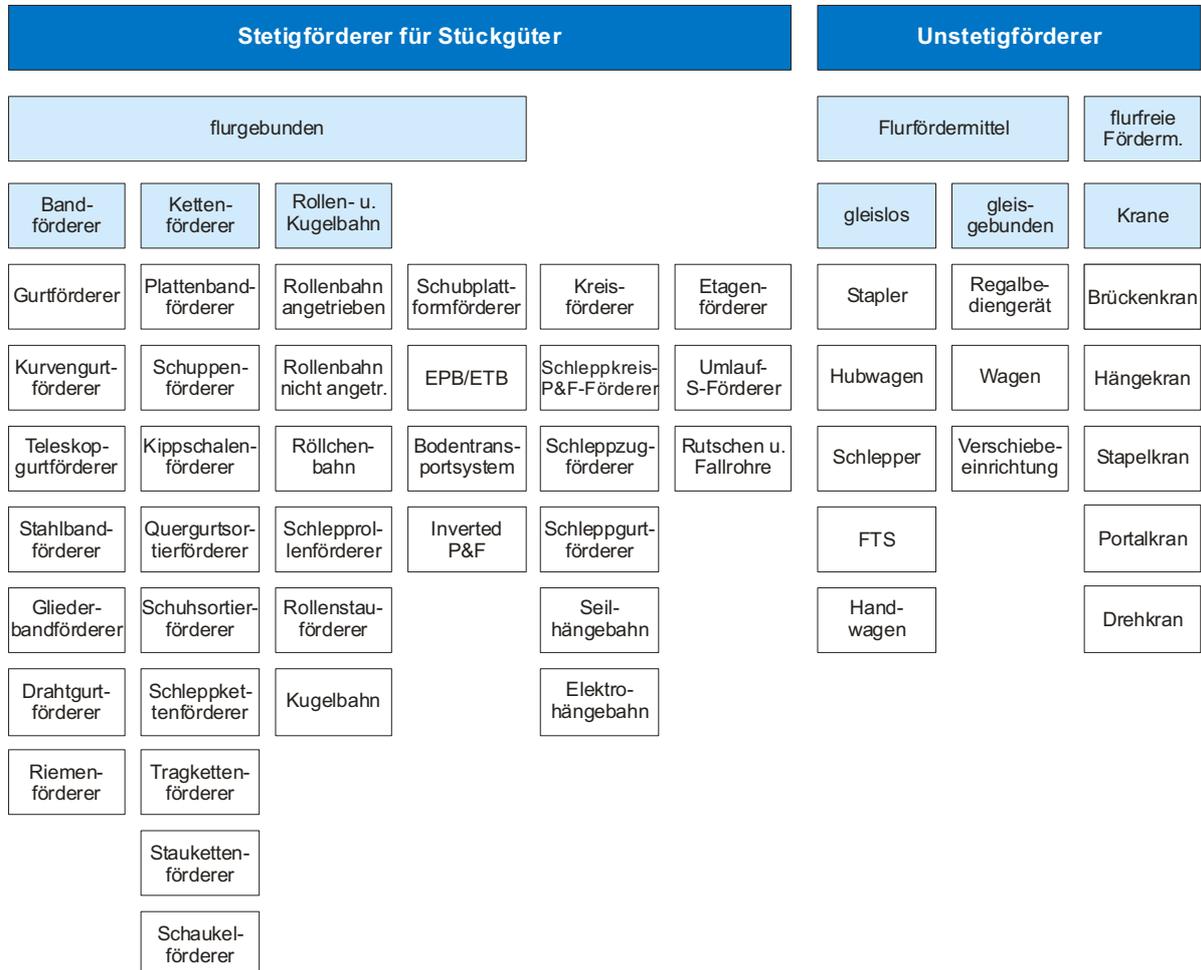


Abbildung 2-11: Einteilung der Transportmittel [Gün-06b]

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 2-12) [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:

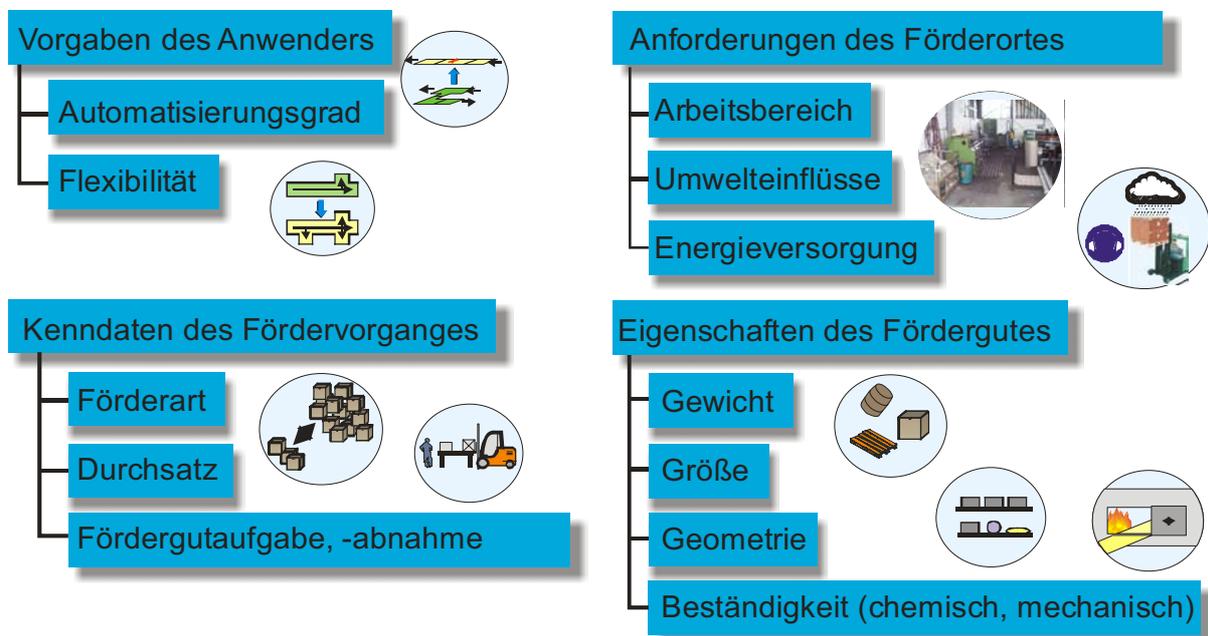


Abbildung 2-12: Auswahlkriterien für Transportsysteme (nach [Rei-05])

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.

### 2.2.2.2 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 Materialflussteuerung, die Informationsflussteuerung und das Lagergebäude.

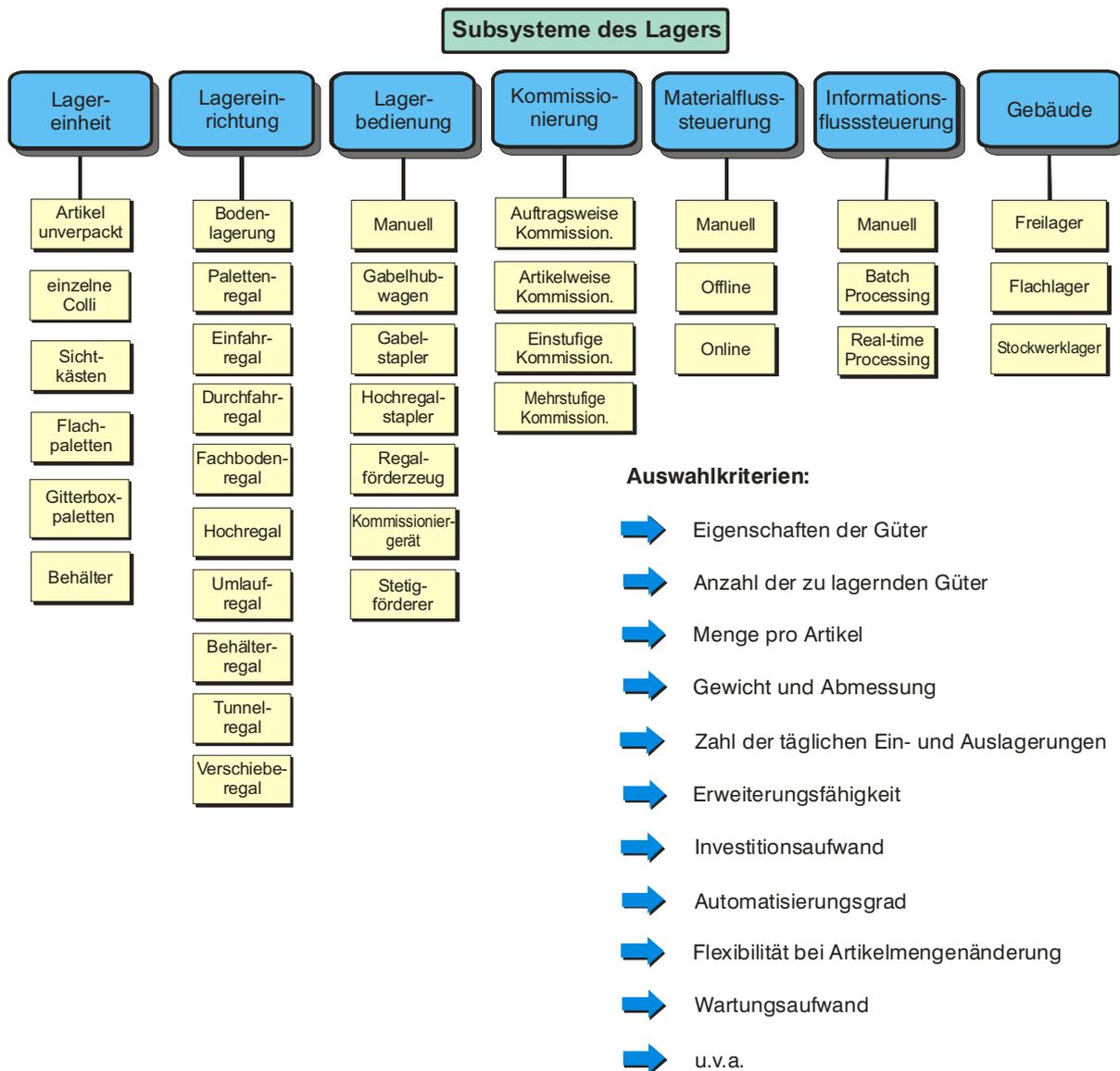


Abbildung 2-13: Subsysteme des Lagers mit Auswahlkriterien (nach [Gün-06b])

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.

### 2.2.2.3 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 2-6).

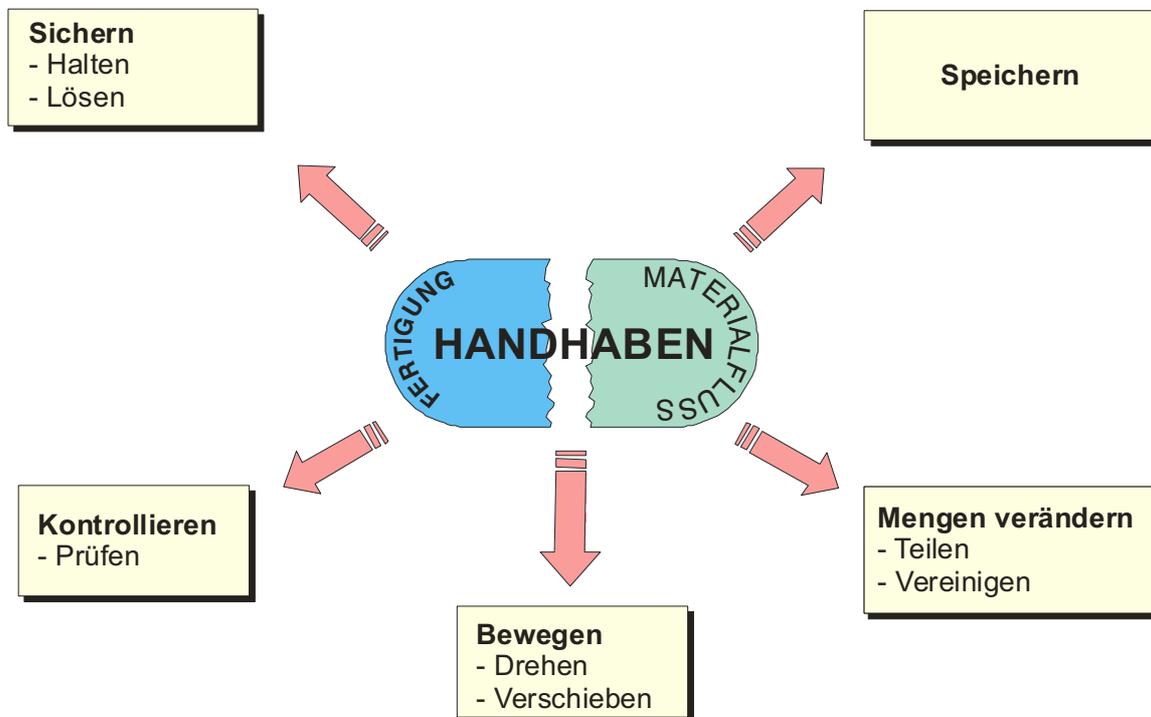


Abbildung 2-14: Teilfunktionen des Handhabens mit entsprechenden Elementarfunktionen [VDI-2860]

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 Planung von Materialflusssystemen

## 3.1 Planungsbegriff

Die Betrachtung und Analyse des Planungsprozesses bei der Entwicklung von Materialflusssystemen ist für diese Arbeit in zweierlei Hinsicht von großer Bedeutung. Zum einen soll eine Einordnung vorgenommen werden, in welchen Planungsabschnitten die Auswahl, Bewertung und Dimensionierung von Materialflusssystemen relevant ist und wie diese Planungssystematik durch den Modularisierungsansatz unterstützt werden kann. Zum anderen soll analysiert werden, welche planungsrelevanten Daten in einer standardisierten Modulbeschreibung hinterlegt werden müssen.

Planung ist eine logistische Funktion, die der Unternehmensführung dazu dient, ihre vorab gesetzten Unternehmensziele zu erreichen [Mar-98]. Nach [VDI-2385] wird die Planung allgemein als die "Suche nach einer realisierbaren Lösung für eine Aufgabe in befristeter Zeit mit vorgegebenem Kostenaufwand unter Berücksichtigung aller wesentlichen Faktoren und Einflussgrößen" beschrieben.

Für die verschiedenen Arten der Planung werden unterschiedliche Bezeichnungen verwendet. Während z.B. Neu-, Erweiterungs-, Sanierungs- oder Rationalisierungsplanung aufgabenbezogene Planungsbegriffe darstellen, sagen die Bezeichnungen Ausführungs-, Grob- oder Feinplanung etwas über den Planungsschritt und über die Genauigkeit der Planung aus. Das betrachtete Planungsgebiet wird durch Begriffe wie z.B. Lager-, Transport-, Materialfluss- oder Fabrikplanung ausgedrückt. Hinsichtlich des zeitlichen Aspekts spricht man von Kurz-, Mittel- und Langfristplanung [Mar-98]. In der vorliegenden Arbeit soll der Fokus auf dem Gebiet der Planung von Materialflusssystemen liegen.

Die Gründe für eine Materialflussuntersuchung mit eventuell nachfolgender Materialflussplanung sind vielschichtig, stehen zum Teil aber in enger Beziehung zueinander. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind einige Beispiele genannt [All-99]:

- Betriebsverlagerungen, -erweiterungen und -umstellungen

- Automatisierung des Transport- und/oder Lagerbereiches
- Geringe Auslastung der Transportmittel
- Hohe Transport- und Lagerkosten
- Hohe Lager- und Zwischenlagerbestände
- Veraltete Transport- und Lagertechnik
- Erweiterung der Produktionsmenge und des Produktspektrums
- Engpässe, Unfälle, Störungen und hohe Durchlaufzeiten
- Hohe Personalkosten, umständliche Ablauforganisation
- Überschreiten von Kostenzielen, mangelhafte Kostentransparenz
  - Behördliche Auflagen

## 3.2 Ablauf der Materialflussplanung

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Planung von Logistiksystemen, die meist unterschiedliche Zielsetzungen aufweisen. Die unterschiedlichen Ansätze können in folgende drei Gruppen gegliedert werden: Allgemeine Planungsvorgehensweisen ohne konkreten Bezug zu Logistiksystemen, Ansätze zur strategischen Logistikplanung und Ansätze zur operativen Planung der Logistik [Due-01]. Die zur Planung von Materialflusssystemen angewandten und entwickelten Methoden sind der Gruppe der Ansätze zur operativen Planung der Logistik zuzuordnen. In der einschlägigen Literatur finden sich eine Vielzahl an Abläufen bei der Planung von Materialflusssystemen [Hep-98], [Jün-89], [Sch-98a], die sich in einzelnen Abläufen und Begriffen unterscheiden. Wichtiger jedoch als gleiche Bezeichnungen und Zuordnungen zu nächst höheren Planungsstufen ist die Durchführung der hinter den einzelnen Planungsphasen stehenden Tätigkeiten an sich, zumal sich in der Planungspraxis die Phasen sowohl zeitlich als auch inhaltlich oft nicht streng voneinander trennen lassen.

Trotz verschiedener Abläufe und Bezeichnungen der Planungsphasen, verschiedener Planungsaufgaben (Neu-, Um- oder Erweiterungsplanung), unterschiedlicher Betreiber (Industrie, Handel oder Dienstleistung) und unterschiedlicher Größen der

Planungsprojekte lässt sich der prinzipielle Ablauf bei Materialflussplanungen in die vier Hauptphasen [Gün-05a]

- Vorarbeiten (Materialflussuntersuchung) bis zur Ermittlung der Planzahlen,
- Grobplanung, mit dem Ziel, zum geeigneten Gesamtkonzept zu gelangen,
- Feinplanung durch detaillierte Ausarbeitung des Grobplanungskonzeptes und
  - Realisierung des Systems

untergliedern.

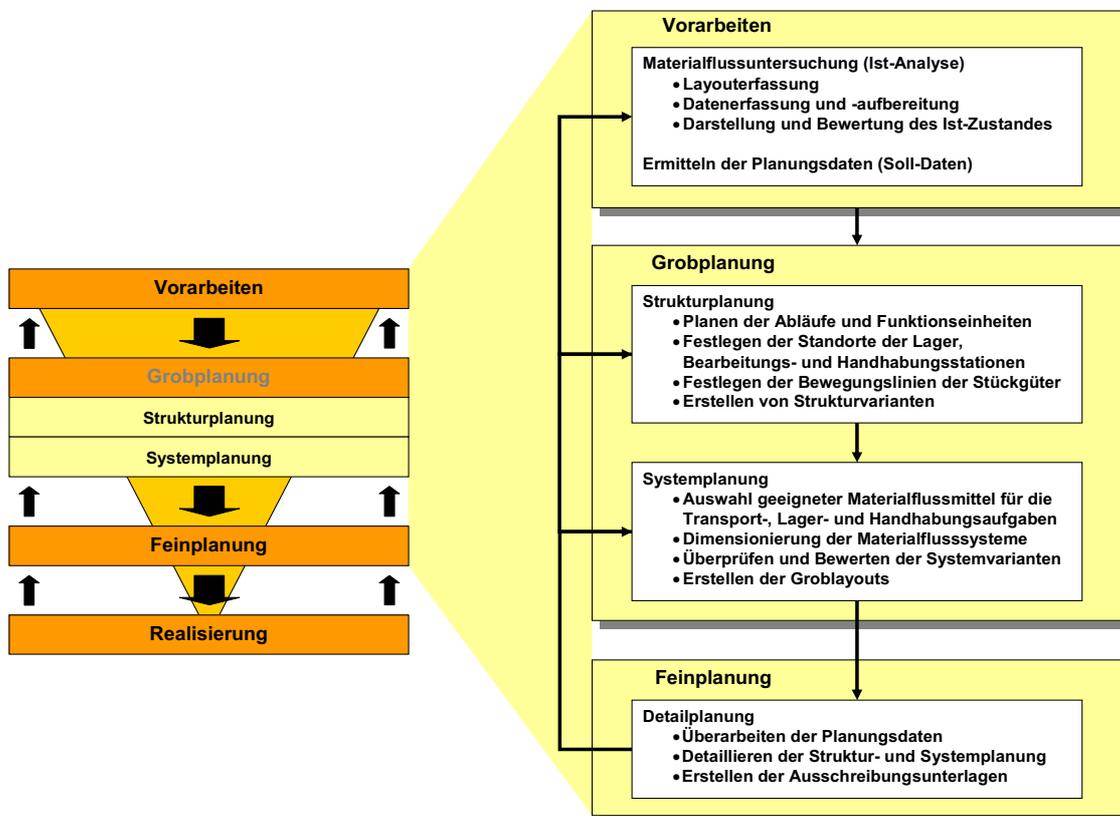


Abbildung 3-1: Hauptphasen einer Materialflussplanung (nach [Gün-05a])

Innerhalb dieser Hauptphasen erfolgt eine schrittweise Verfeinerung des geplanten Konzepts, wobei die Ergebnisse einer Phase jeweils als Eingangsgrößen für den nachfolgenden Abschnitt dienen. Im realen Planungsprozess ist allerdings eine solche starre sequenzielle Vorgehensweise nicht möglich, da, wie in jedem Planungs-

prozess, Entscheidungen zu Zeitpunkten getroffen werden müssen, zu denen noch kein ausgeprägtes Systemwissen vorliegt. Erweisen sich also Entscheidungen aus einer vorgelagerten Phase als ungünstig, kann ein Rücksprung erfolgen und eine Korrektur vorgenommen werden. Dadurch entsteht ein iteratives Vorgehen, wie es in Abbildung 3-1 angedeutet ist.

#### **3.2.1 Vorarbeiten**

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 3-1 sind die wichtigsten Parameter aufgelistet, die bei der Durchführung einer Ist-Analyse bei Materialflussplanungen zu berücksichtigen sind [Arn-03]:

| 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 Planung von Materialflusssystemen

|   |  |
|---|--|
| <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 3-1: Überblick über die bei einer Ist-Analyse zu berücksichtigten Daten (nach [Arn-03])

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. Nach einer Verdichtung und einer verbindlichen Verabschiedung bildet das Soll-Datengerüst die Grundlage der Grobplanung von Materialflusssystemen.

#### 3.2.2 Grobplanung

Die Grobplanung dient dazu, mehrere Alternativen zur Lösung der gestellten Aufgabe zu erarbeiten und die gefundenen Lösungsvarianten auf ihre technische und wirtschaftliche Machbarkeit zu überprüfen und abzuschätzen. Die Phase der Grobplanung ist der kreativste und wichtigste Arbeitsschritt bei der Planung von Materialflusssystemen, da in dieser Phase wesentliche Merkmale und Eigenschaften des zukünftigen Materialflusssystems festgelegt werden, die zu einem späteren Zeitpunkt nur mit erheblichen Aufwand wieder geändert werden können.

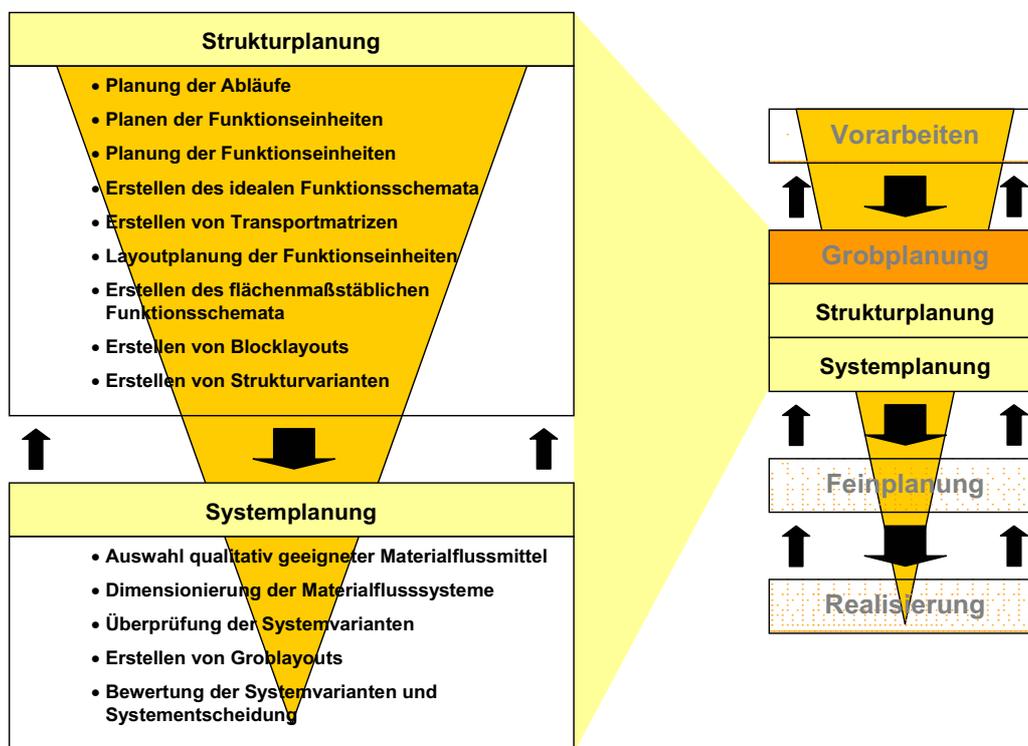


Abbildung 3-2: Teilphasen einer Grobplanung mit den entsprechenden Tätigkeiten (nach [Gün-03a])

Die Grobplanung ist geprägt durch ein stufenweises und iteratives Vorgehen, bei dem immer wieder Varianten gebildet, beurteilt und ausgewählt werden und so eine ständig zunehmende Detaillierung der zu lösenden Planungsaufgabe erreicht wird. Abbildung 3-2 zeigt die beiden wichtigen Teilphasen der Grobplanung, wobei die Teilphasen Strukturplanung und Systemplanung bis zur endgültigen Lösungsfindung in einem iterativen Prozess durchlaufen werden.

### 3.2.2.1 Strukturplanung

Im Vordergrund der Strukturplanung steht der Entwurf verschiedener Ablauffolgen, die sich aus einzelnen Arbeitsschritten, Materialflussoperationen oder Transportvorgängen zusammensetzen. Als Ergebnis der Planung der Ablauffolgen entstehen mit Hilfe der Layoutplanung eine Reihe von Strukturvarianten, auf denen die nachfolgende Systemplanung aufbaut. Eine Darstellung der Vorgehensweise bei der Strukturplanung und die dabei verwendeten Methoden findet sich in Abbildung 3-3 [Rei-05].

#### Planung der Abläufe und Funktionseinheiten

Auf Basis der Soll-Planungsdaten und der bereits existierenden Randbedingungen werden die Arbeitsvorgänge und Operationen geplant und festgelegt, mit denen die Lösung der in der Aufgabenstellung definierten Planungsaufgabe erreicht werden kann [Jün-89], [VDI-2498]. Unter Arbeitsvorgängen und Operationen sind hierbei alle wesentlichen, zur Erfüllung einer Produktionsaufgabe notwendigen Arbeitsschritte bzw. alle wichtigen, zur Lösung einer Materialflussaufgabe erforderlichen Materialflussoperationen zu verstehen [Ket-84, Jün-89]. Das Ergebnis dieses Planungsschrittes sind Ablaufschemata, die die funktionellen Verknüpfungen und Reihenfolgen der erarbeiteten Arbeitsvorgänge und Operationen verdeutlichen.

Mit dem Festlegen von Fertigungs- und Montageprinzipien bzw. von Lagerprinzipien und -strategien fällt die Entscheidung für bestimmte Organisationsformen, wie Werkstattfertigung, Fließfertigung, Mann zur Ware oder Ware zum Mann. Auf diesen Festlegungen aufbauend müssen die einzelnen Arbeitsschritte und Materialflussoperationen unter räumlichen und zeitlichen Aspekten in entsprechenden Funktionseinheiten zusammengefasst werden [Ket-84], [VDI-2498]. Die ablauf- und funktionsgerechte Zuordnung der einzelnen Funktionseinheiten lässt sich dabei in idealen Funktionsschemata darstellen.

### 3 Planung von Materialflusssystemen

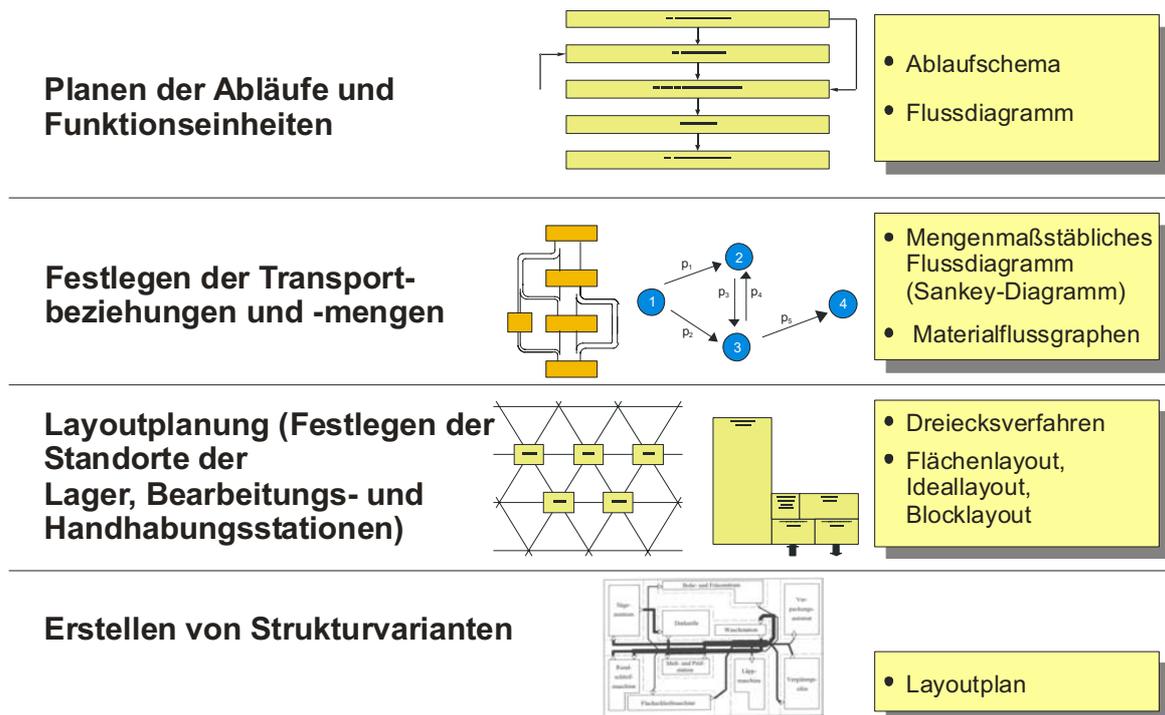


Abbildung 3-3: Vorgehensweise und verwendete Methoden bei der Strukturplanung

#### Festlegen der Transportbeziehungen und -mengen

Die Beziehungen zwischen den Funktionseinheiten entsprechen in der Realität dem Transport von Material (Rohmaterial, Werkstücke, Fertigprodukte, verpackte Waren), wobei sich die einzelnen Transportmengen aus den Soll-Planungsdaten ableiten lassen. Übliche Einheiten für die Angabe von Transportmengen sind Stückzahl pro Zeiteinheit, Gewicht pro Zeiteinheit oder Volumen pro Zeiteinheit. Wird das Material zu Transporteinheiten zusammengefasst, so lassen sich die Transportmengen auch in Transporteinheiten/Zeiteinheit angeben. Die Verbindung der Transportmengen mit den dazugehörigen Funktionsschemata führt zu mengenmaßstäblichen Flussbildern, wie z.B. Sankey-Diagrammen oder zu Transportmatrizen.

#### Layoutplanung

Im Rahmen der Layoutplanung wird eine möglichst optimale Zuordnung der Funktionseinheiten angestrebt, um den Transportaufwand weitestgehend zu minimieren und gleichzeitig wirtschaftliche Abläufe zu gewährleisten. Dazu werden zum einen die Bereiche nahe beieinander angeordnet, zwischen denen die größten Transportmengen auftreten, zum anderen wird versucht, die Materialrückläufe möglichst ge-

ring zu halten. Ein zur Gruppe der heuristischen Verfahren zählendes, konstruktives Layoutplanungsverfahren ist das Dreiecksverfahren. Das Prinzip dieses Verfahrens besteht darin, die Bereiche mit den stärksten Transportintensitäten in einem Layoutkern anzusiedeln und an diesen Kern nach und nach die weiteren Bereiche anzulagern. Der Name des Verfahrens leitet sich aus dem regelmäßigen Raster mit gleichseitigen Dreiecken ab, das zur Konstruktion verwendet wird. Das Ergebnis dieser Layoutplanung ist eine auf der Grundlage von Transportmengen optimierte Anordnung der Funktionseinheiten, die jedoch weder den Flächenbedarf noch die genaue räumliche Lage der Einheiten zueinander berücksichtigt.

Für das weitere Planungsvorgehen ist es notwendig, den jeweiligen Flächenbedarf der einzelnen Funktionseinheiten zu ermitteln [Ket-84], [VDI 2498]. Für Bereiche der Produktion werden dazu die Soll-Flächen aus den vorhandenen, bereinigten Ist-Flächen abgeleitet oder über Kennzahlen bestimmt. Für Lagerbereiche müssen je nach Lagerungsart, Lagertechnik und Lagerstrategie zusätzliche Dimensionierungsuntersuchungen durchgeführt werden, um den erforderlichen Flächenbedarf zu erhalten [Arn-03], [VDI-2498]. Auf Basis der idealen Funktionsschemata können dann mit Hilfe der ermittelten Flächenbedarfe flächenmaßstäbliche Funktionsschemata erstellt werden, in denen sowohl die Größe als auch die ideale Zuordnung der Funktionseinheiten ersichtlich wird.

Die einzelnen Bereiche der flächenmaßstäblichen Funktionsschemata werden in einem Gebäuderaster zusammengeführt, wobei die ideale Anordnung gemäß der Layoutplanung der Funktionseinheiten zu beachten ist [Arn-03], [Ket-84], [VDI-2498]. Das Ergebnis dieser Zusammenführung ist das Blocklayout, das auch Ideallayout genannt wird.

### **Erstellen von Strukturvarianten**

Die ideale Anordnung der Funktionseinheiten im Blocklayout muss mit den gegebenen baulichen Randbedingungen abgestimmt werden. Dazu ist festzulegen, wie die Funktionseinheiten auf die Gebäude und in den Gebäuden verteilt werden sollen. Ein besonderes Augenmerk bei diesem Planungsschritt liegt auf der Berücksichtigung von Erweiterungsmöglichkeiten der einzelnen Bereiche. Es besteht sonst die Gefahr, dass der optimierte Materialfluss der durchgeführten Planung bei Erweiterungen zu erheblichen Materialflussproblemen führt.

### 3.2.2.2 Systemplanung

Im Rahmen der Systemplanung werden für die einzelnen Arbeitsschritte und Materialflussoperationen der entwickelten Strukturvarianten qualitativ geeignete Materialflussmittel ausgewählt. Da bei dieser Auswahl und Zuordnung einzelne Vorgänge zusammengefasst oder aufgeteilt werden können, ergeben sich für jede gewonnene Strukturvariante der vorhergehenden Planungsstufe wiederum eine Reihe von Systemvarianten, also technische Lösungen. Nach der Dimensionierung und Überprüfung der technischen Varianten findet deren Bewertung statt. Auf dieser Grundlage kann anschließend entschieden werden, welche Systemvariante in der nachfolgenden Feinplanung und Realisierung verwirklicht werden soll (vgl. Abbildung 3-4) [Rei-05].

#### **Auswahl geeigneter Materialflussmittel**

Für die Auswahl geeigneter Transport- und Lagermittel müssen zunächst die Merkmale der einzelnen Vorgänge in der Prozesskette und damit die Anforderungen an die Materialflussmittel festgelegt werden [Ket-84], [Fis-97]. Zu diesen Merkmalen gehören z.B.

- die geometrischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften des Gutes,
- die Eigenschaften von Transportweg und Lagerraum (dazu zählen bauseitige Bedingungen, Umgebungseinflüsse, Länge, Neigung und Arbeitsbereich) und
- die Eigenschaften des Transport- und Lagerprozesses (z.B. Mengendurchsatz, Transportleistung, Zusatzfunktionen, Automatisierungsstufe, Flexibilität).

### Auswahl geeigneter Materialflussmittel für die Transport-, Lager- und Handhabungsaufgaben



- Unstetig-/Stetigförderer
- Flurfreie Förderer
- Flurförderer
- Lagertechnik
- Handhabungstechnik

### Dimensionierung der Materialflusssysteme

| nach<br>von | WE | WL | KO  | VE  | WA  |
|-------------|----|----|-----|-----|-----|
| WE          | 0  | 80 | 20  | 0   | 0   |
| WL          | 0  | 0  | 170 | 0   | 0   |
| KO          | 0  | 90 | 0   | 125 | 0   |
| VE          | 0  | 0  | 0   | 0   | 125 |
| WA          | 0  | 0  | 0   | 0   | 0   |

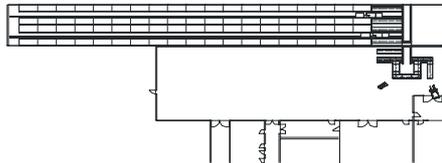
- Materialflussmatrix
- Statische Dimensionierung
- Simulation

### Überprüfen und Bewerten der Systemvarianten

| Zielkriterien     | Planungsvarianten |                             |       |           |                              |       |           |                               |       |  |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|-------|-----------|------------------------------|-------|-----------|-------------------------------|-------|--|
|                   | 0:                | I                           |       |           | II                           |       |           | III                           |       |  |
|                   | Bewertung         | Werte                       | Werte | Bewertung | Werte                        | Werte | Bewertung | Werte                         | Werte |  |
| Flurfürsicherheit | 11                | 8                           | 85    | 2         | 22                           | 8     | 8         | 85                            |       |  |
| Flur-Freizug      | 9                 | 10                          | 90    | 10        | 90                           | 4     | 36        |                               |       |  |
| Flurverwendung    | 7                 | 4                           | 28    | 8         | 42                           | 8     | 56        |                               |       |  |
| Lagerverwendung   | 7                 | 10                          | 70    | 2         | 14                           | 4     | 28        |                               |       |  |
| Zugriffzeit       | 6                 | 8                           | 48    | 6         | 36                           | 6     | 36        |                               |       |  |
| Nutzenwerte       |                   | N <sub>I</sub> = 302<br>75% |       |           | N <sub>II</sub> = 204<br>51% |       |           | N <sub>III</sub> = 222<br>65% |       |  |

- Tech. Bewertung
- Wirtschaftlichkeitsrechnung
- Nutzwertanalyse

### Erstellen des Groblayouts



- Layoutplan

Abbildung 3-4: Vorgehensweise und verwendete Methoden bei der Systemplanung

Innerhalb dieses Planungsabschnittes spielt die in dieser Arbeit angestrebte Bewertung von wandelbaren Materialflusssystemen eine große Rolle. Die Idee ist dabei, dass anhand von definierten Flexibilitätskriterien eine Vorauswahl und eine Eingrenzung geeigneter Materialflusssysteme erfolgen soll.

Das Ergebnis dieses Planungsschrittes besteht aus einer Reihe von Systemvarianten, die technische Lösungen der in der Aufgabenstellung definierten Planungsaufgabe darstellen.

### Dimensionierung der Materialflusssysteme

Bei der Dimensionierung der Systemvarianten werden die Beschreibungsgrößen der Materialflusssysteme quantitativ festgelegt. Dabei sind zeitunabhängige Größen (z.B. geometrische Abmessungen) und zeitabhängige Größen (z.B. Geschwindigkeiten) zu unterscheiden. Zur Festlegung der zeitunabhängigen Größen sind vor allem die Eigenschaften der Güter und der baulichen Gegebenheiten zu berücksichtigen. Die Dimensionierung der zeitabhängigen Größen wird auf der Basis der zu transportie-

renden Mengen und der zu überbrückenden Entfernungen vorgenommen, die in der Transport- und Entfernungsmatrix dokumentiert sind. Sollen die eingesetzten Materialflusssysteme darüber hinaus dynamisch ausgelegt werden, so müssen auch die für die Transport- und Lagersysteme eingesetzten Steuerungsstrategien berücksichtigt werden.

Die Transportmatrix wird bereits zur Optimierung der Anordnung der Funktionseinheiten benutzt. Nach der Festlegung der Transporthilfsmittel und damit der Transporteinheiten lassen sich in diesem Planungsschritt aus den in ihr enthaltenen Transportmengen je nach Transportmittel die Anzahl der Transporte berechnen.

Die Entfernungsmatrix lässt sich für jede im Rahmen der Strukturplanung erstellte Strukturvariante als Distanz zwischen den einzelnen Funktionseinheiten aufstellen. Sie ist mit den realen Transportwegen der einzelnen Systemvarianten zu detaillieren, da z.B. ein flurfrees Transportsystem das Transportgut auf anderen Wegen transportiert als ein flurgebundenes System, das im Verlauf des Transportweges wesentlich größeren Einschränkungen unterliegt.

Die Dimensionierung von Materialflusssystemen wird durch den in dieser Arbeit gewählten Modularisierungsansatz unterstützt. Modulare Materialflusssysteme können gezielt aus einzelnen Modulen zusammengesetzt werden, um somit genau den gestellten Anforderungen zu entsprechen.

#### **Bewertung der Systemvarianten**

Im abschließenden Schritt der Systemplanung werden die geeigneten und funktionsfähigen Varianten einer Bewertung unterzogen. An dieser Stelle darf nicht vergessen werden, den durch kurzfristige und nicht investitionsintensive Maßnahmen verbesserten Ist-Zustand als weitere Planungsvariante in die Bewertung mit aufzunehmen. Als Bewertungsgrundlage dienen die Wirtschaftlichkeit sowie weitere quantitative (Leistungsdaten, Verfügbarkeit usw.) und qualitative (Sicherheit, Erweiterbarkeit usw.) Kriterien.

Um die Bewertung möglichst objektiv zu halten, muss sie methodisch durchgeführt werden. Besonders qualitative Kriterien unterliegen subjektiven Beurteilungen, die weitestgehend zu objektivieren sind. Zu den hierfür eingesetzten Bewertungsmethoden zählen z.B. die Nutzwertanalyse und die zweistufige Punktbewertung, weil sie

zuverlässig, schnell und leicht verständlich sind. Eine ausführliche Beschreibung der Nutzwertanalyse findet sich z.B. bei Günthner [Gün-05a], die zweistufige Punktbewertung wird von Martin [Mar-98] erklärt.

Eine wichtige Bewertungsgrundlage bei der Entscheidung für eine Planungsvariante ist der Nachweis ihrer Wirtschaftlichkeit. Dafür stehen verschiedene Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung zur Verfügung. An dieser Stelle soll auf die einschlägige Fachliteratur zur Wirtschaftlichkeitsrechnung verwiesen werden [Her-99], [Bri-02], [Doh-01].

### **Erstellen von Groblayouts**

Aufbauend auf den bereits erarbeiteten Strukturvarianten werden von den sinnvollen und funktionsfähigen Systemvarianten der Auswahl- und Dimensionierungsphase Groblayouts erstellt. Groblayouts stellen konzeptbestimmende und investitionsbeeinflussende Aspekte dar. Sie enthalten Gebäudegrundrisse und -abmessungen, Lage und Größe von Funktionseinheiten, wichtigen Anlagen und Maschinengruppen und eine prinzipielle Darstellung der eingesetzten Transport- und Lagersysteme.

### **3.2.3 Feinplanung**

Im ersten Schritt der Feinplanung werden die bisherigen Planungsdaten überprüft, ergänzt und detailliert, so dass auf dieser Grundlage eine Weiterentwicklung stattfinden kann. Nach der Überarbeitung der Planungsdaten werden je nach Notwendigkeit und Finanzierbarkeit die Anzahl und die Reihenfolge der Realisierungsstufen bestimmt. Anschließend wird der Planungsumfang der ersten Stufe je nach Größe in Teilbereiche gegliedert, die einer verfeinerten Strukturplanung, Systemplanung und Dimensionierung unterzogen werden [Gün-91], [Jün-89]. Besonders wichtig ist hierbei auch eine weitere Detaillierung bezüglich der Steuerung und Organisation der geplanten Materialflusssysteme. Eine weitere Aufgabe im Rahmen der Feinplanung ist die Erstellung der Ausschreibungsunterlagen und eine Bewertung der eingehenden Angebote. Die Feinplanung wird durch die Auftragserteilung und die Auftragsbestätigung abgeschlossen.

### **3.2.4 Realisierung**

Bei der Realisierung werden alle geplanten Arbeiten und Maßnahmen von den beauftragten Firmen verantwortlich durchgeführt. Die Leitung, Koordinierung und Überwachung dieser Tätigkeiten übernimmt ein Projektleiter. Aus dieser Tatsache wird ersichtlich, dass die Realisierung des Projektes im eigentlichen Sinne keine Planung mehr darstellt, sondern vor allem Koordinierungs-, Überwachungs- und Prüfarbeiten umfasst.

Nach Abschluss der Montage- und Einrichtungsarbeiten findet eine Abnahmeprüfung für alle Anlagen und Maschinen statt. Erst danach kann die Übergabe an den Auftraggeber erfolgen.

# 4 Wandelbare Fabrikstrukturen

## 4.1 Veränderungen der Rahmenbedingungen

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. Dieser Umstand ist auf die geänderten Rahmenbedingungen zurückzuführen, denen sich heutige Unternehmen verstärkt ausgesetzt sind. Seit Beginn der 1990er Jahre wird in Anlehnung an die Strömungsmechanik vom turbulenten Unternehmensumfeld gesprochen [War-92]. Auf ein Unternehmen wirken sowohl interne als auch externe Einflüsse bzw. Turbulenzen, die Wandlungsprozesse erfordern (vgl. Abbildung 4-1) [Wes-03], [Wie-05]. Diese Einflüsse wirken entweder auf das gesamte Unternehmen oder nur auf einzelne Bereiche.

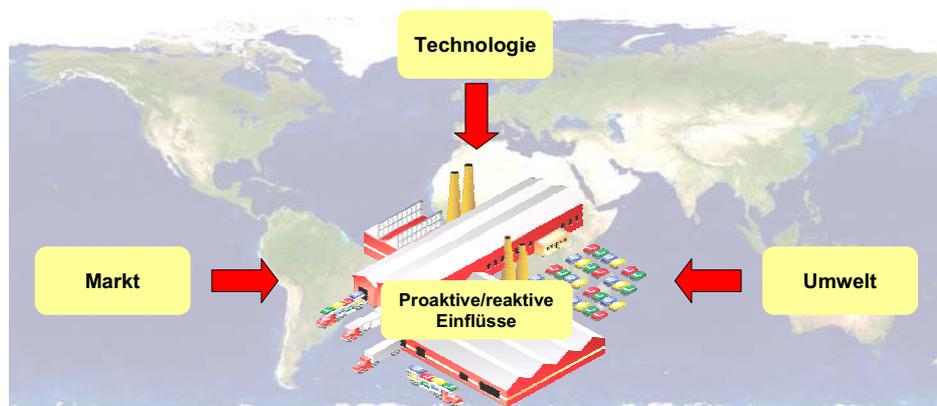


Abbildung 4-1: Fabrik im Spannungsfeld externer und interner Einflüsse

### 4.1.1 Externe Unternehmenseinflüsse

Turbulenzen, hervorgerufen durch externe Unternehmenseinflüsse, können ihren Ursprung in Technologie-, Markt- oder Umweltveränderungen haben [Wes-04], [Wir-01].

Wesentliche technologische Wandlungstreiber sind neue Werkstoffe, neue Fertigungstechnologien oder neue IT-Technologien [Abe-03], [Wie-05], [Gün-05b]. Am folgenden Beispiel soll die Beutung neuer Fertigungstechnologien für Produktionsunternehmen dargestellt werden. Die industrielle Anwendbarkeit von Laserschweißen bei metallverarbeitenden Unternehmen hat dazu geführt, dass die konventionellen Stanzmaschinen durch das wesentlich flexiblere und leistungsstärkere Laserschweißen ersetzt worden sind. Die Substitution zog in vielen Fällen weit reichende fabrikplanerische Konsequenzen nach sich. Bisher für das Stanzen benötigte Flächen können nun für andere Zwecke genutzt werden. Ferner wurden durch den Wegfall der Lagerung von Stanzwerkzeugen erhebliche Lagerflächen frei. Notwendige Schallschutzmaßnahmen zur Eindämmung des Lärms waren nicht mehr notwendig, dafür wurden erhöhte Anforderungen an die Luftabsaugung in der Halle gestellt [Wie-05].

Externe Wandlungstreiber, die unter dem Oberbegriff Marktveränderungen zusammengefasst werden können, beruhen im Wesentlichen auf den folgenden drei Einflussfaktoren [Rüt-00]:

- Globalisierung der Absatzmärkte
- Wandel vom Produzenten zum Käufermarkt
- Produkte

Die Variantenvielfalt steigt stetig an und stellt produzierende Unternehmen vor neue Herausforderungen. Hervorgerufen wird diese starke Zunahme der Variantenvielfalt zum einen durch die Anforderungen der Käufer, aber nicht zu letzt auch durch verschiedene Märkte (Globalisierung) mit unterschiedlichen lokalen Anforderungen (Klima, Kultur, Gesetze, etc.) [Rei-04], [Kla-02].

Auf dem Gebiet der Produktentwicklung führt der Trend zu Mass Customization zu einem grundlegenden Neuaufbau der Fabrikstrukturen. Zukünftige Fabriken müssen in der Lage sein, sich schnell auf die individuellen Kundenwünsche einstellen zu können [Pil-01], [Tse-03], [Sche-99]. Dies verlangt kurze Reaktionszeiten und eine sehr hohe Flexibilität im Aufbau und in den Abläufen. Die Produktion kundenindividueller Güter führt zu einer Reduzierung der Größe der Fertigungslose, steigert da-

mit die Zahl der abzuwickelnden Produktionsaufträge und so den gesamten materialflusstechnischen und steuerungstechnischen Aufwand erheblich [Gün-02].

Heute besteht zunehmend der Zwang, dass neue Produkte immer schneller auf den Markt gebracht werden müssen. Kurze Entwicklungszeiten (Time to Market) sowie eine kundenauftragsspezifische Fertigung bei geringer Lieferzeit (Time to Customer) wird vom Käufer gefordert und ist bei der heute einfachen Vergleichbarkeit der Angebote mittels e-Commerce im globalen Wettbewerb häufig wettbewerbsentscheidend. Die aufgrund kürzerer Innovationszyklen sinkende Produktlebenszeit führt zu mehr Entwicklungsaufwand, der in kürzerer Zeit geleistet werden muss. Die häufigen Veränderungen an den Produkten haben Auswirkungen auf alle Bereiche der Fertigung, aber auch auf organisatorische Strukturen und Abläufe [Dom-04], [Wes-04].

Externe Wandlungstreiber aus dem Bereich Umwelt resultieren aus den schärfer werdenden Arbeitsschutz- und Umweltauflagen, steigenden Erwartungen der Mitarbeiter und Kunden sowie den Tarifvereinbarungen zwischen Gewerkschaften und Arbeitgebern [Wie-05].

Nicht nur durch die zuvor genannten Aspekte, sondern auch durch neue Formen der Zusammenarbeit von Unternehmen in Netzwerken oder Entwicklungen im Bereich des Supply Chain Managements steigt die Logistikkomplexität. Die Zeiten, in denen ein Unternehmen nahezu im Alleingang ein Fahrzeug entwickelte und produzierte, sind lange vorbei. Heute steht hinter jedem Automobilhersteller ein hochkomplexes Netzwerk aus Zulieferern und Dienstleistern, die bereits einen Wertschöpfungsanteil von über 70% innehaben [Gün-05b]. Neue Organisationsformen, neue Formen des Informations- und Datenaustausches (Informatisierung) und nicht zuletzt die Globalisierung der Märkte mit der Folge einer zunehmenden Anzahl von Standorten (Dezentralisierung) einschließlich aller resultierenden Anforderungen (z.B. local content) sind hier wesentliche Einflussgrößen [Hei-04], [Dom-04].

Der Kunde fordert über die genannten Anforderungen hinaus zukünftig auch noch eine hohe Transparenz über die Abwicklung von Geschäftsvorfällen. Auch für das Unternehmen selbst ist diese dringend erforderlich, um innerhalb von Unternehmensnetzwerken oder auch bei E-Business-Aktivitäten den Überblick zu behalten.

Die Fähigkeit, sich schnell an die verändernden Marktbedürfnissen anpassen zu können, stellt für Unternehmen mit einer am Kunden orientierten Produktion häufig ein zentrales Erfolgskriterium dar. Zusammenfassend lassen sich die Anforderungen an Unternehmen durch die Forderung nach höherer Anpassungsfähigkeit abrunden. Das Unternehmen muss in der Lage sein, sich sehr schnell neuen Rahmenbedingungen anpassen zu können.

### **4.1.2 Interne Unternehmenseinflüsse**

Die unternehmensinternen Einflüsse können in reaktive und proaktive Wandlungstreiber aufgeteilt werden.

Zu den reaktiven Wandlungstreibern zählen vor allem Schwachstellen im Produktionsprozess, auf die erst im Nachhinein, also nach deren Auftreten, reagiert wird. Zu den Schwachstellen werden dabei eine mangelnde Produktqualität, eine zu geringe Logistikqualität (zu hohe Lieferzeiten, zu hohe Bestände, zu hohe Durchlaufzeit, Abweichung von den Lieferterminen, u.a.), eine zu geringe Prozesssicherheit, zu hohe Produktionskosten sowie unübersichtliche Strukturen und Materialflüsse gezählt [Teu-04].

Die proaktiven Wandlungstreiber können ein Verfolgen einer Offensivstrategie seitens der Unternehmensleitung bedeuten [Wie-02]. Kerninhalt dieser Offensivstrategie ist das bewusste und damit vorhersehbare Erzeugen von Turbulenzen am Markt. Das Ziel dieses proaktiven Handelns ist eine Erhöhung des Marktanteils oder die Erschließung neuer Märkte. Zur Erreichung dieser Ziele werden Maßnahmen eingeleitet, die weder der Kunde direkt fordert, noch ein Wettbewerber schon anbietet, die aber dennoch direkt vom Kunden wahrgenommen werden können („Unique Selling Proposition“). Exemplarisch sei in diesem Zusammenhang die Einführung neuer Produkttechnologien genannt.

### **4.1.3 Zeitliche Einteilung**

Neben der Einteilung der Wandlungstreiber in externe und interne Faktoren lassen sich die Turbulenzursachen nach der jeweiligen zeitlichen Reaktionszeit klassifizieren. Dabei kann bei kurzfristiger Reaktionszeit meist von einem Zeitraum von Stun-

den bis zu wenigen Tagen gesprochen werden. Andere Turbulenzen können dagegen Veränderungen bestimmter Größen über einen längeren Zeitraum sein, der sich innerhalb von Wochen bis zu Monaten hinziehen kann. Eine Ursache für diese Veränderung kann z.B. eine Änderung des Nachfrageverhaltens (z.B. saisonale Nachfrage) der Kunden sein [Wes-03].

Rakesh Narain [Nar-00] und weitere Autoren klassifizieren die vorherrschenden Unternehmenseinflüsse in Abhängigkeit des jeweiligen zeitlichen Horizonts in operative, taktische und strategische Turbulenzen. Die operativen Turbulenzen bezeichnen kurzfristige Veränderungen, die aufgrund von Maschinenstörungen, Personal ausfall, Lieferproblemen und Bedarfsschwankungen auftreten. Diese betreffen die unmittelbar an der Auftragsabwicklung beteiligten technischen, logistischen und personalbezogenen Ressourcen. Unter mittelfristig taktischen Turbulenzen wird eine für das gegenwärtige Geschäftsfeld erforderliche Prozesssicherheit hinsichtlich Produktqualität, Lieferzeit und -treue sowie der Herstellkosten verstanden. Schließlich zielen die langfristig, strategisch angelegten Turbulenzen auf die Beherrschung von Veränderungen der Produkte, basierend auf den Käufer- und Wettbewerbsverhalten [Wie-02], [Nar-00].

In einer vom Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) durchgeführten Umfrage wurden 200 Unternehmen zu den häufigsten Turbulenzursachen befragt [Wes-03]. Die zehn am häufigsten genannten Ursachen zeigt Abbildung 4-2. Zusätzlich eingezeichnet ist die Einschätzung über die Stärke der durch die Ursachen ausgelösten Turbulenzen. Die Auswertung zeigt, dass externe Turbulenzursachen häufiger auftreten und im Durchschnitt eine stärkere Auswirkung auf das Unternehmen haben als interne Unternehmenseinflüsse, da diese meist nicht selbst beeinflussbar und deshalb auch schwer beherrschbar sind. Somit liegt ein wesentlicher Faktor für den langfristigen Erfolg in der Beherrschung der genannten externen Unternehmenseinflüsse und erfordert von den Unternehmen eine schnelle Anpassungsfähigkeit.

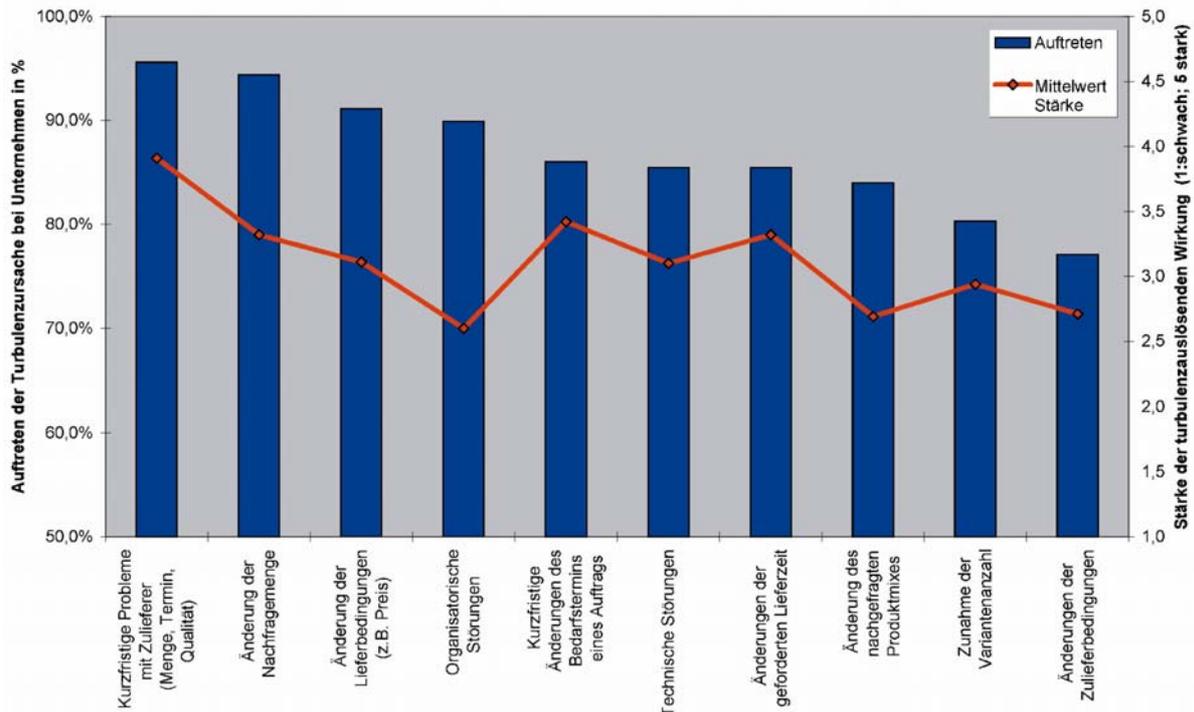


Abbildung 4-2: „Top 10“ der Turbulenzursachen nach ihrem Auftreten im Unternehmen (nach [Wes-03])

## 4.2 Anforderungen an zukünftige Fabrikstrukturen

### 4.2.1 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 "An-

passungsfähigkeit, 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 automatisierten 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. Gerade durch die in Kapitel 4.1 beschriebenen Veränderungen im Marktumfeld erwiesen sich solche hoch automatisierten, aber unflexiblen Fertigungssysteme als nicht mehr zeitgemäß [Gün-03a].

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 Strukturkopp-

lung auf (vgl. Kapitel 2.1, Abbildung 2-5). 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-00], [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-00].

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 4-3). 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.

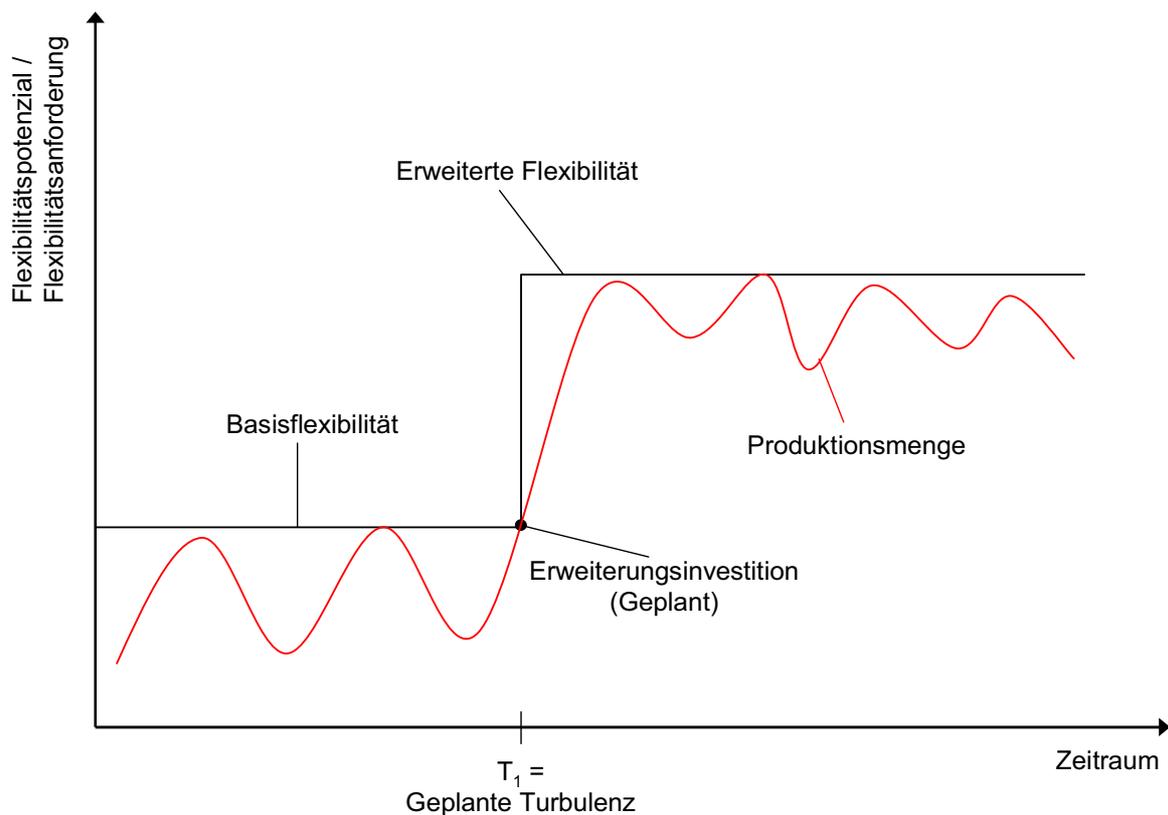


Abbildung 4-3: Zusammenspiel Basisflexibilität und erweiterte Flexibilität

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.

### 4.2.2 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 2.1).

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 4-4).

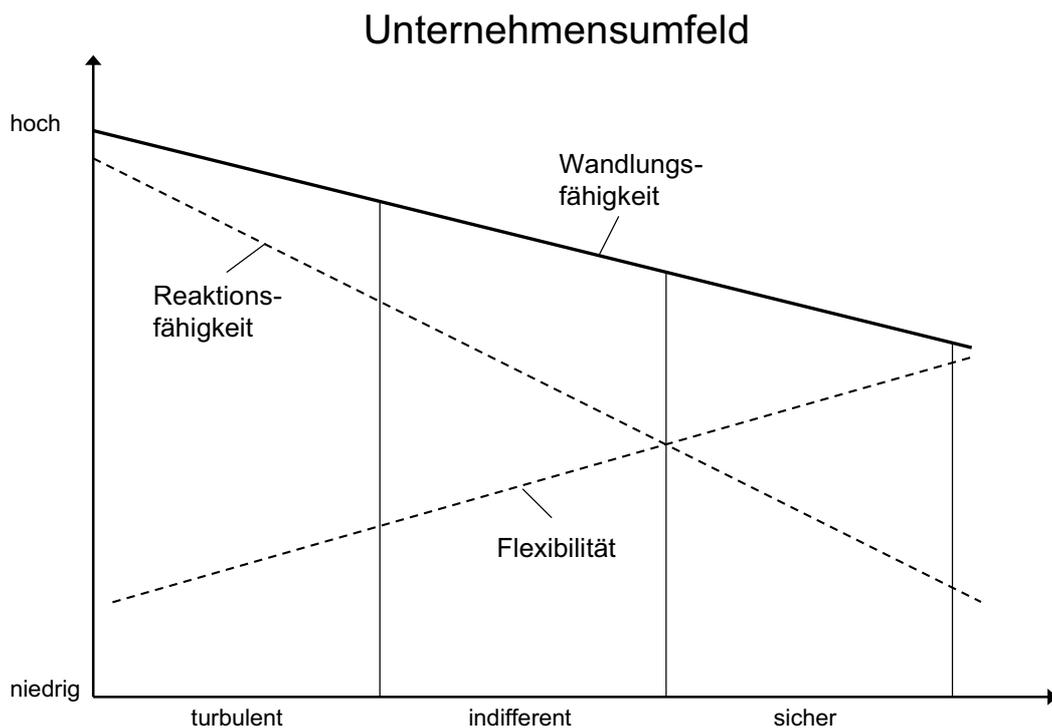


Abbildung 4-4: Ansatz zur Abschätzung der notwendigen Wandlungsfähigkeit [Rei-00]

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 4-5).

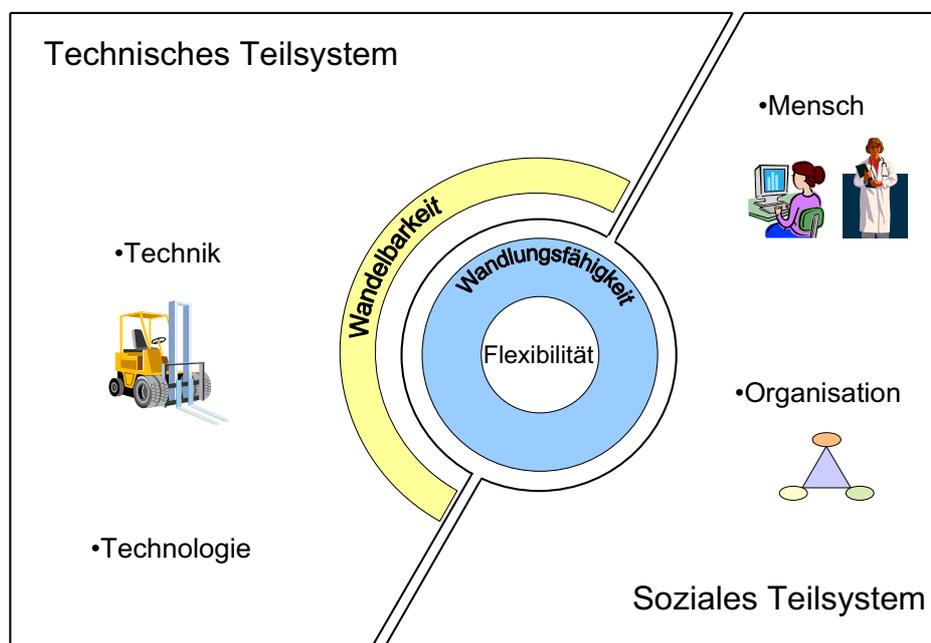


Abbildung 4-5: Zusammenhang Wandlungsfähigkeit – Wandelbarkeit [Wes-00]

Eine weitere Definition von Anpassungsfähigkeit eines Systems liefert das abgeschlossene Forschungsprojekt „Plug+Produce“ [Hil-05]. Dabei wird bei dieser Defini-

tion 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 Spielraum zur Veränderung bezeichnet werden, der nur eine elastische Anpassung ohne eine substantielle Veränderung des Fabrikbaus 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 4-6). 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 4.2.1 beschriebenen Bestandteilen „Basisflexibilität“ und „erweiterte Flexibilität“, ist dabei ein Bestandteil der Wandlungsfähigkeit.

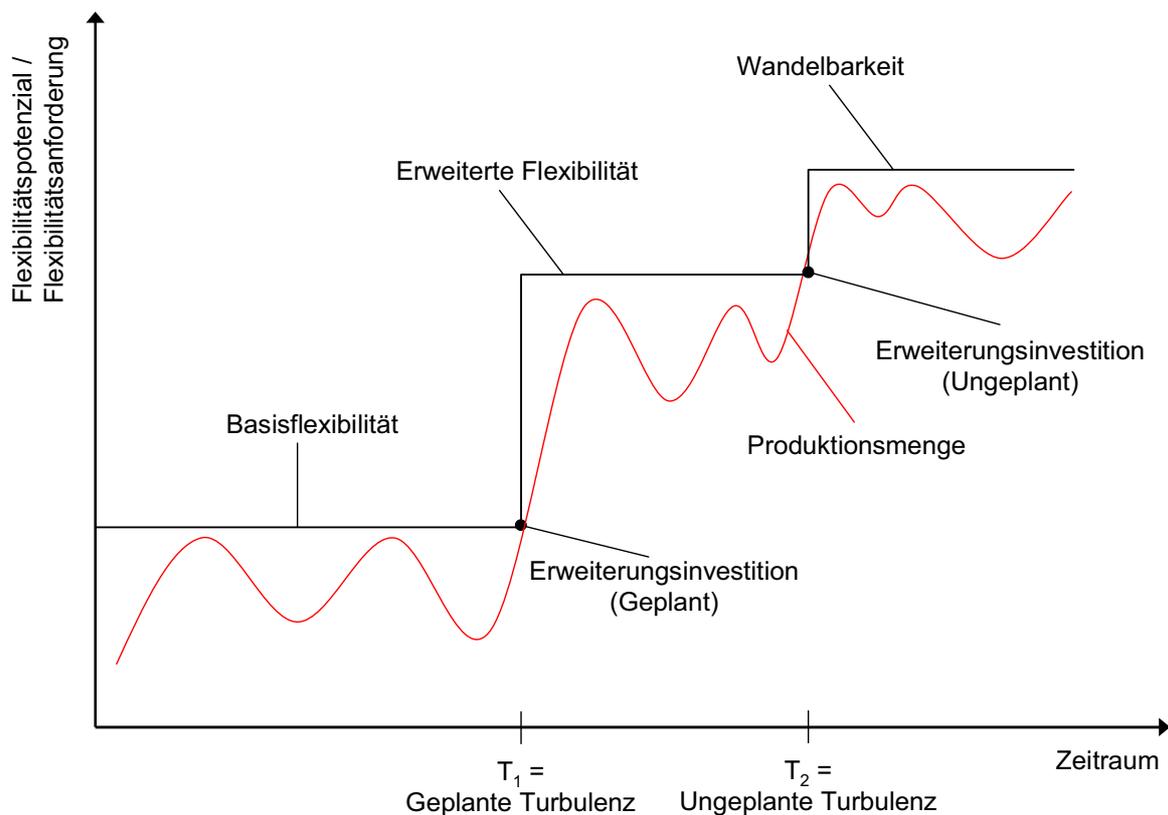


Abbildung 4-6: Zusammenspiel Flexibilität und Wandelbarkeit

### 4.2.3 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 4-7) [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 angestrebten Nutzen der Wandlungsfähigkeit, gilt es zu maximieren.

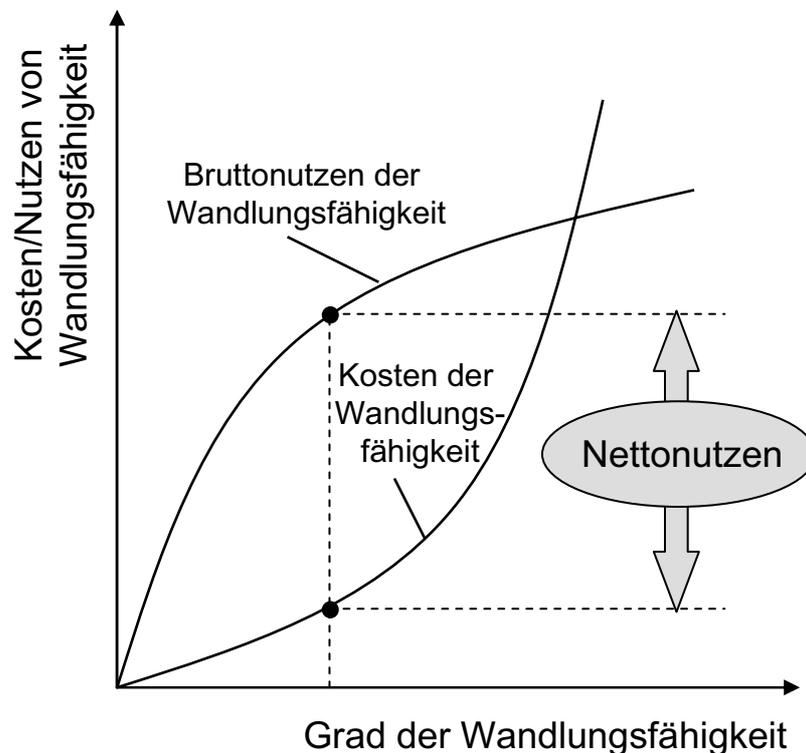


Abbildung 4-7: Nutzen der Wandlungsfähigkeit (nach [Sch-04a])

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 (nach [Nyh-04a])

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 Spannungsfeld der beiden Kostenarten – Investitionskosten und Wandlungsprozesskosten – ein Optimum zu finden (vgl. Abbildung 4-8). 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].

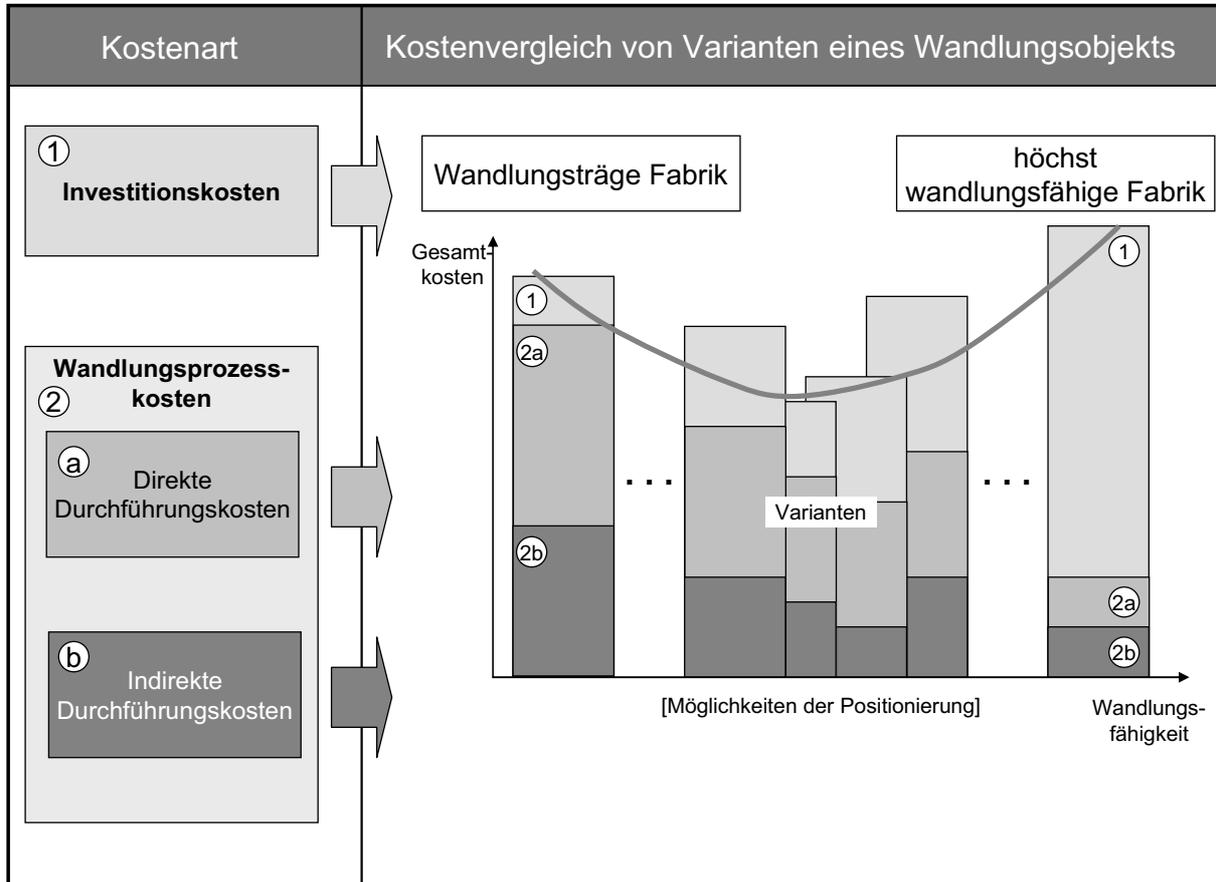


Abbildung 4-8: Kostenarten und –vergleich wandlungsfähiger Systeme (nach [Nyh-04a])

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-04b], [Zäh-05].

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 [Eve-01b], [Sch-03c], [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.

### **4.3 Zusammenfassung**

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 – ist dabei als eine Art Steigerung von Flexibilität anzusehen. In Ergänzung zur Flexibilität, die die 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 der Betrachtung der Flexibilität wird je nach Aktivierungszeit zwischen Basisflexibilität und erweiterter Flexibilität unterschieden.

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 den Transportsystemen zwischen den Fertigungsbereichen.

Die in diesem Kapitel erarbeitete allgemeingültige Definition von Flexibilität und Wandelbarkeit stellt die Basis für die weiteren Betrachtungen dar. Zur Auswahl von Mate-

rialflusssystemen weisen aber diese Definitionen in Hinblick auf Flexibilität und Wandelbarkeit einen zu hohen Abstraktionsgrad auf. Vor diesem Hintergrund sollen in dem folgenden Kapitel konkrete Auswahlkriterien erarbeitet, um somit die Eigenschaften wandelbarer Materialflusssysteme bewerten zu können.



# 5 Wandelbare Materialflusssysteme

## 5.1 Beurteilung der Wandelbarkeit von Materialflusssystemen

### 5.1.1 Flexible Materialflusssysteme

Soll die Flexibilität eines Materialflusssystems (Mfs) 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.

Die folgenden beiden Aspekte zeigen mögliche Kriterien zur Einteilung und Bewertung der Flexibilität auf, die hauptsächlich auf dem Gebiet von Produktionssystemen eingesetzt werden:

- In [Refa-90] wird die Flexibilität von Produktionssystemen untergliedert in kurzfristige (Produktflexibilität, Fertigungsredundanz und Mengenflexibilität) und langfristige (Anpassflexibilität und Erweiterungsflexibilität) Flexibilitätsarten:

| Bezeichnung              | Quantitative Beschreibung   | Betrachtungshorizont |
|--------------------------|---|----------------------|
| Produktflexibilität      | Anzahl unterschiedlicher Werkstücke; Grad der Freizügigkeit bei der Maschinenbelegung                       | Kurzfristig          |
| Fertigungsredundanz      | Anzahl alternativ einsetzbarer Betriebsmittel   | Kurzfristig          |
| Mengenflexibilität       | Wirtschaftliche Grenzen für zusätzliche Schichten oder Kurzarbeit, Bereithalten zusätzlicher Betriebsmittel | Kurzfristig          |
| Anpassflexibilität       | Umbauaufwand  | Langfristig          |
| Erweiterungsflexibilität | Aufwand für nachträgliche Erweiterung   | Langfristig          |

Tabelle 5-1: Flexibilitätsarten nach [Refa-90]

- Nach [Tem-93] werden hingegen acht Untergruppen der Flexibilität abgegrenzt:

| Flexibilitätsart                    | Bezug                 | Beschreibung  |
|-------------------------------------|-----------------------|---|
| Maschinen-Flexibilität              | Maschine              | Leichtigkeit der Umstellung auf eine neue Aufgabe                                     |
| Materialfluss-Flexibilität          | Materialfluss-technik | Transport unterschiedlicher Produkte auf beliebigen Wegen im System                   |
| Arbeitsplan-Flexibilität            | Produkt               | Möglichkeit alternativer Arbeitspläne   |
| Systemänderungs-Flexibilität        | System                | Veränderung der Anzahl der Ressourcen   |
| Produktmixänderungs-Flexibilität    | System                | Änderbarkeit der Produkte ohne externe Veränderungen des Systems aber mit Rüstvorgang |
| Produktmix-Flexibilität             | System                | Änderbarkeit der Produkte ohne Rüstaufwand  |
| Durchlauf-Flexibilität              | System                | Möglichkeit, Produkte auf unterschiedlichen Pfaden durch das System herzustellen      |
| Produktmengenänderungs-Flexibilität | System                | Fähigkeit, bei unterschiedlichem Durchsatz wirtschaftlich zu arbeiten                 |

Tabelle 5-2: Flexibilitätsarten nach [Tem-93]

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 5-1). 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

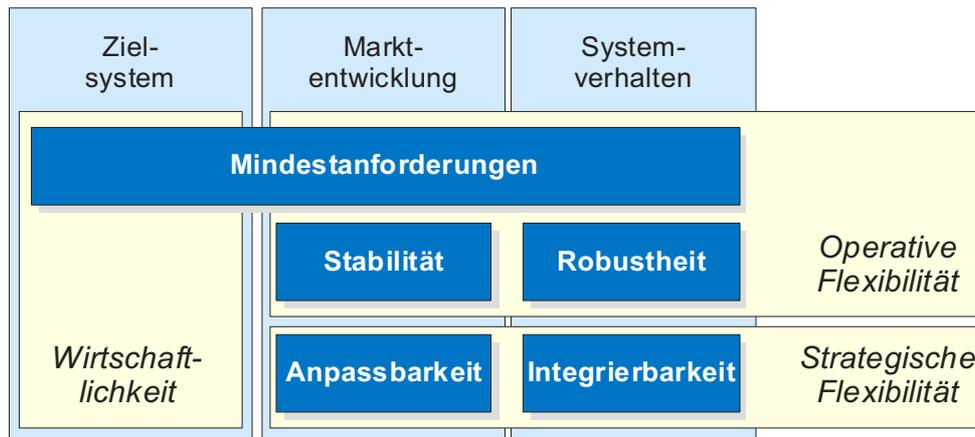


Abbildung 5-1: Untergliederung der Flexibilitätsziele [Hal-99]

- 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 Materialflussteuerungen zwischen Veränderungsfähigkeit, Strategievariabilität, Planungsunterstützung und Aktualität der Planung. Dabei sind unter dem Begriff Veränderungsfähigkeit die Anforderungen an Layoutveränderungen, Austausch und Erweiterung von Materialflusskomponenten und weitere organisatorische Veränderungen zusammengefasst.
- Zwischen Ortsflexibilität bzw. Layoutflexibilität bezüglich neuer Auf- und Abgaborte, 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 5-3), die Lagertechnik (Tabelle 5-4) und Lagerbedienung (Tabelle 5-5) folgende Kriterien für die Flexibilität erarbeitet:

| <b>Flexibilitätskriterien</b>                                       |
|---|
| • Änderung der Transportwege  |
| • Änderung der Bereitstell- und Übernahmepunkte                     |
| • Leistungsflexibilität bzgl. Transportkapazitäten und -frequenzen  |
| • Leistungsflexibilität bzgl. Abruf- und Bereitstellzeiten          |
| • Handhabung unterschiedlicher Artikel- und Ladehilfsmittelspektren |
| • Technischer Ausfall und Notfallkonzepte                           |
| • Reaktionsfähigkeit und Durchführung von Eilaufträgen              |

Tabelle 5-3: 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 5-4: Einfluss der Lagertechnik auf die Flexibilität

| <b>Flexibilitätskriterien</b>  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsflexibilität bzgl. Ein-/Auslagerungen</li> </ul>                   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Handhabung unterschiedlicher Artikel und Ladehilfsmittelspektren</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Übernahme von Aufgaben in der Lagervorzone</li> </ul>                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Layout- und Übergabepunktänderungen</li> </ul>                              |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaktionsfähigkeit und Durchführung von Eilaufträgen</li> </ul>             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Technischer Ausfall und Notfallstrategien</li> </ul>                        |

Tabelle 5-5: 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 5-2) [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.

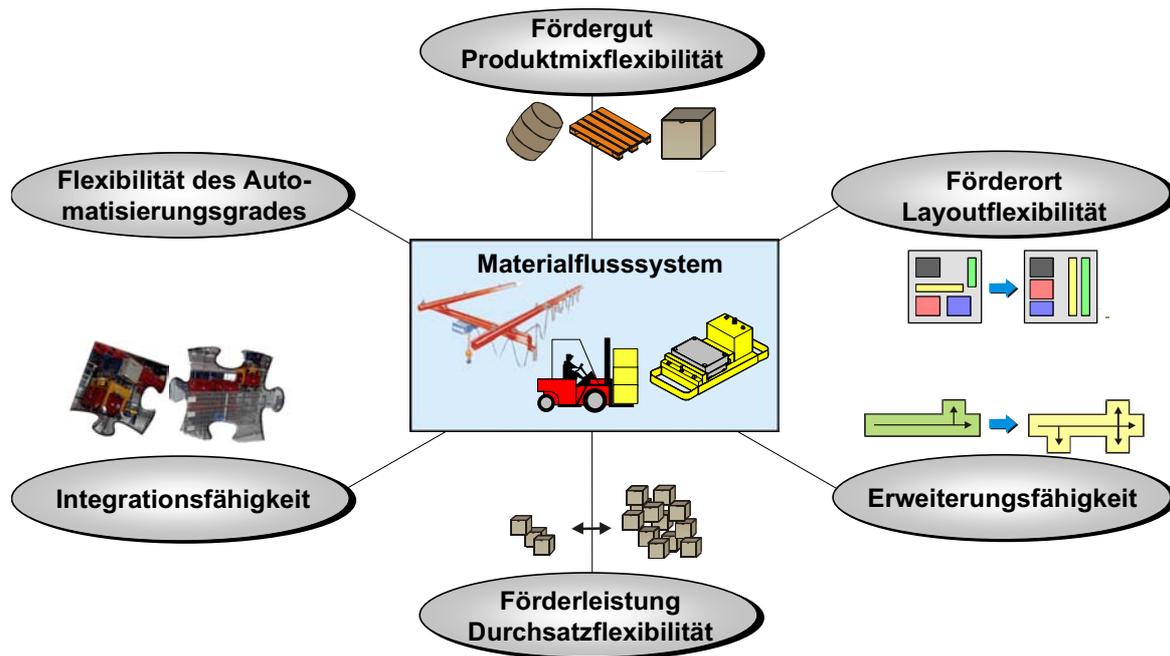


Abbildung 5-2: Flexibilitätsanforderungen an Materialflusssysteme nach [Han-01]

Werden alle aufgeführten Definitionen der Flexibilität eines Materialflusssystems zusammengeführt und die gemeinsame Schnittmenge daraus gebildet, ergeben sich folgende, in Tabelle 5-6 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 Materialflusssystems 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 5-6: Anforderungen an ein flexibles Materialflusssystem

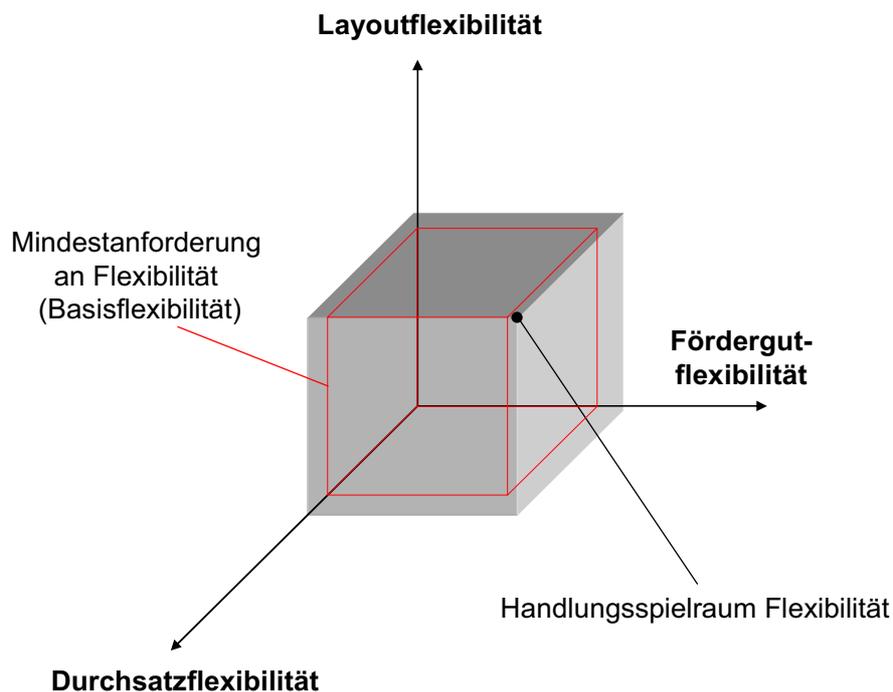


Abbildung 5-3: Darstellung der Flexibilität

Bei der Planung und Auslegung von Materialflusssystemen gilt es das notwendige Maß an Mindestflexibilität (= Basisflexibilität, vgl. Kap. 4.2.1) 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 5-3 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 4.2.2), bedarf es einer Ergänzung der bisher genannten Eigenschaften.

### 5.1.2 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 Layoutveränderungen 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 4.2.3 dargestellt, wirtschaftlich nicht sinnvoll, da die Kosten für die Wandelbarkeit im Vergleich zum daraus resultierenden Nutzen überproportional steigen (vgl. Abbildung 4-7). 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 zusätzliche Eigenschaften erfüllen. In der Literatur wird in Bezug auf die Beschreibung der Wandelbarkeit vermehrt die Eigenschaften Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit genannt, die somit auch in dieser Arbeit bei der weiteren Beschreibung der Wandelbarkeit von Materialflusssystemen verwendet werden sollen [Han-01], [Wil-06].

- **Erweiterungsfähigkeit:**

Unter Erweiterungsfähigkeit wird allgemein die Möglichkeit verstanden, ein bestehendes Materialflusssystem durch Hinzufügen von systemeigenen Bauteilen und Fahrzeugen zu erweitern (vgl. Abbildung 5-4). 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.

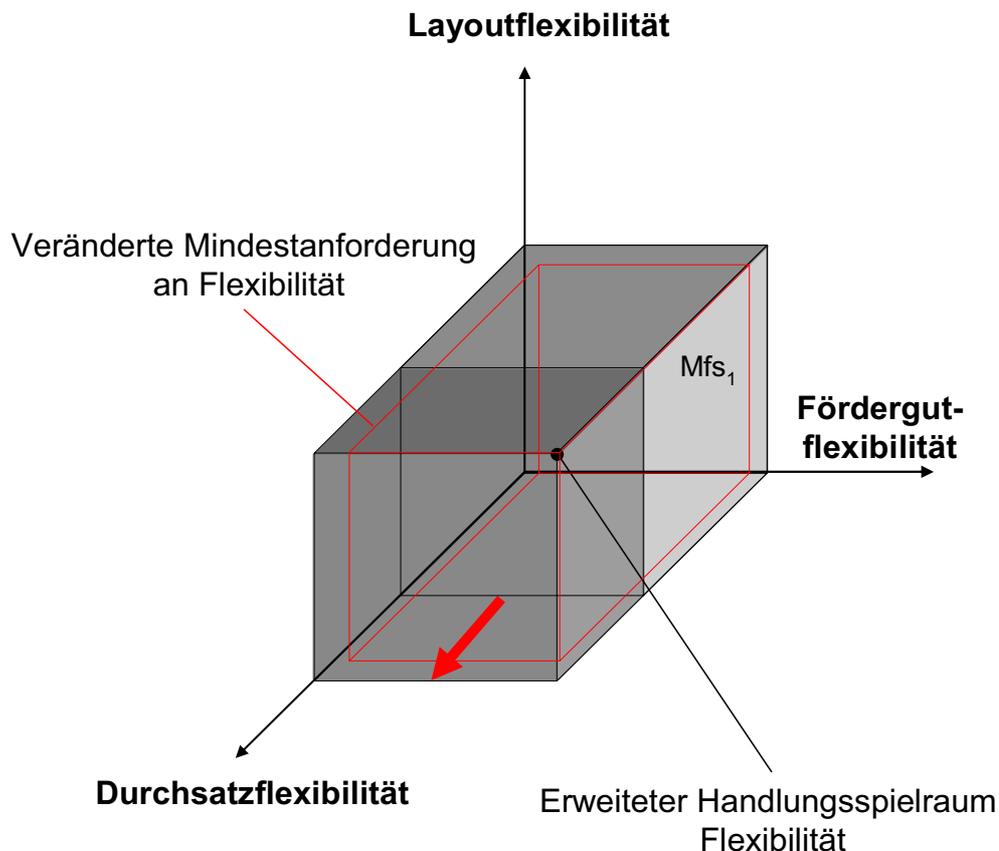


Abbildung 5-4: Anpassung der Flexibilität durch Erweiterung

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 steuerungstechnische Verbindungen mit anderen Materialflusssystemen eingehen zu können und Materialflusssysteme auf steuerungstechnischer Seite in Leit- oder

PPS-Systeme zu integrieren. In Ergänzung zur Erweiterungsfähigkeit bezieht sich die Integrationsfähigkeit deshalb auf das Hinzufügen von verschiedenartigen Materialflusssystemen (vgl. Abbildung 5-5). 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.

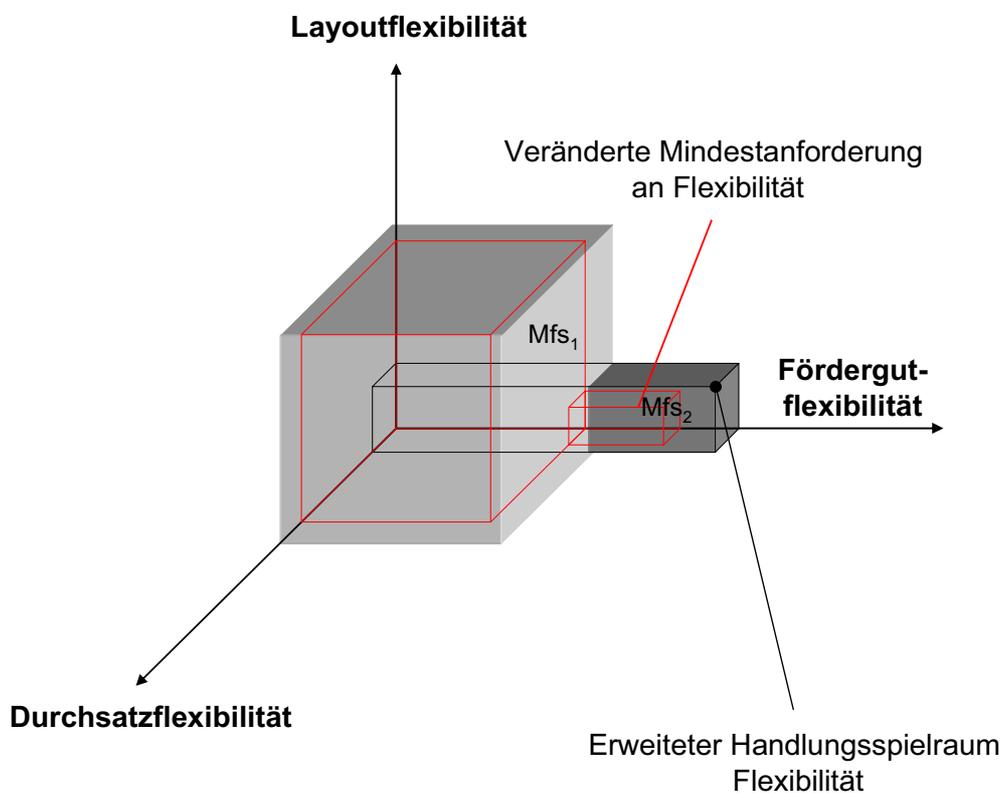


Abbildung 5-5: Anpassung der Flexibilität durch Integrationsfähigkeit

Die beiden beschriebenen Eigenschaften eines wandelbaren Materialflusssystems, Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit, spielen auch bei der Betrachtung der erweiterten Flexibilität (vgl. Kapitel 4.2.1) 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 Flexibili-

tät 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 5-6). 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.

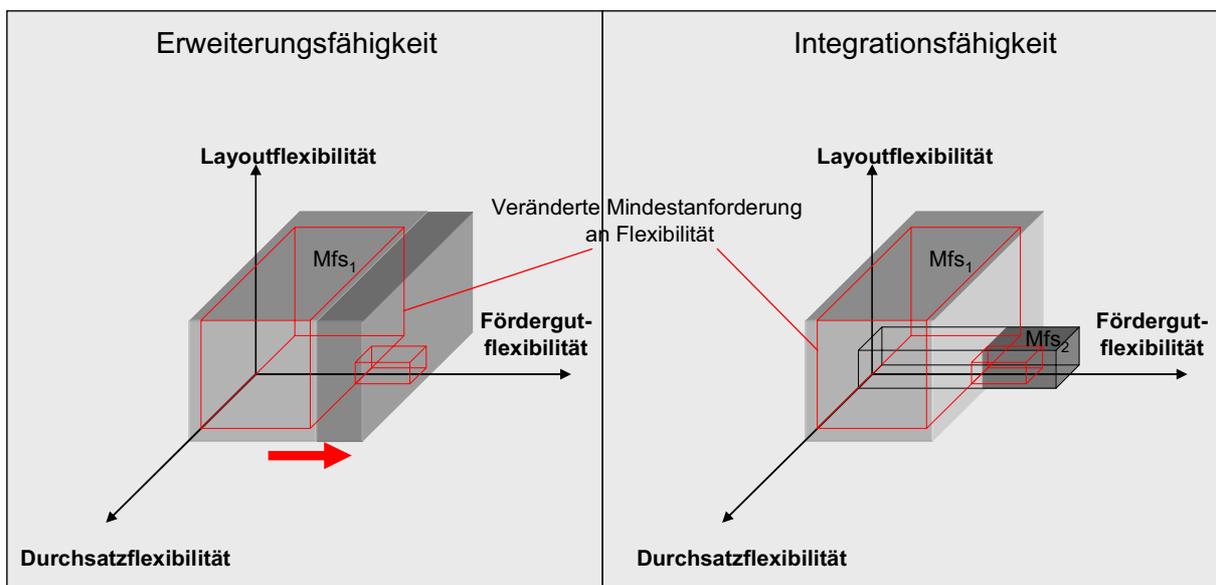


Abbildung 5-6: Vergleich Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit in Bezug auf Erhöhung der Fördergutflexibilität

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.

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

Die in Kapitel 5.1 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.

### **5.2.1 Layoutflexibilität**

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 5-7). In Bezug auf die Höhe kann die Flexibilität nach fixer oder variabler Höhe der Übergabepunkte eingeteilt werden können (Abbildung 5-8).

In der Grobplanungsphase (vgl. Kapitel 3.2.2) wird zu diesem Zeitpunkt die Mindestanforderung an die Layoutflexibilität festgelegt, d.h. es wird bestimmt, wie flexibel die Übergabepunkte sein müssen, so dass sich der Lösungsraum durch den Wegfall der nicht mehr in Frage kommenden Systeme reduziert.

| 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:<br>– Variabel innerhalb fix vorgegebener Linie                |             |
| 4    | Übergabepunkte variabel innerhalb einer beliebiger Linie:<br>– Variabel innerhalb zur Verfügung stehender Transportwege |             |
| 5    | Übergabepunkte unabhängig vom Layout  |             |

Abbildung 5-7: Flächenmäßige Betrachtung der Layoutflexibilität

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.

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

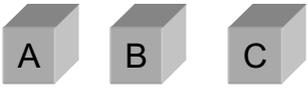
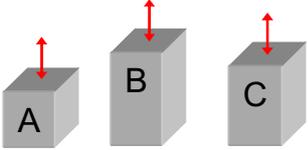
| Wert     | Bezeichnung                         | Darstellung   |
|----------|-------------------------------------|---|
| <b>1</b> | Übergabeplätze in der Höhe fix      |  |
| <b>2</b> | Übergabeplätze in der Höhe variabel |  |

Abbildung 5-8: 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 5-7 dargestellt. Für die Kategorie „Übergabeplätze 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>• Fahrerloses Transportsystem (ohne Hubplattform)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektronhängebahn</li> <li>• Fahrerloses Transportsystem (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 5-7: Kategorisierung wichtiger Transportmittel hinsichtlich Layoutflexibilität

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

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

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 5-9). 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.

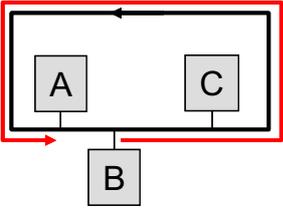
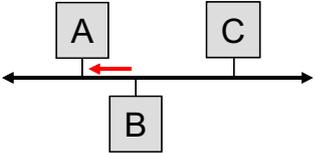
| Wert | Bezeichnung                       | Darstellung   |
|------|-----------------------------------|---|
| 1    | Materialfluss in einer Richtung   |   |
| 2    | Materialfluss richtungsunabhängig |  |

Abbildung 5-9: Durchsatzflexibilität unter Berücksichtigung der Materialflussrichtung („Richtungsabhängigkeit“)

Eine Kategorisierung wichtiger Transportmittel, die in Materialflusssystemen vermehrt zum Einsatz kommen, ist in Tabelle 5-8, nach dem Kriterium der Durchsatzflexibilität „Richtungsabhängigkeit“ strukturiert, dargestellt.

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

Tabelle 5-8: 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 5-9 sind einige Kriterien aufgestellt, um die Durchsatzflexibilität bei bestehenden Materialflusssystemen zu erhöhen und somit die Voraussetzung für wandelbare Materialflusssysteme zu bilden.

## 5.2 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 Fördermittelanzahl</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 5-9: 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.

### **5.2.3 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 Standardladehilfsmitteln**

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 5-10). Innerhalb der Grenzen der ausgewählten Ladehilfsmittel ist das Materialflusssystem flexibel.

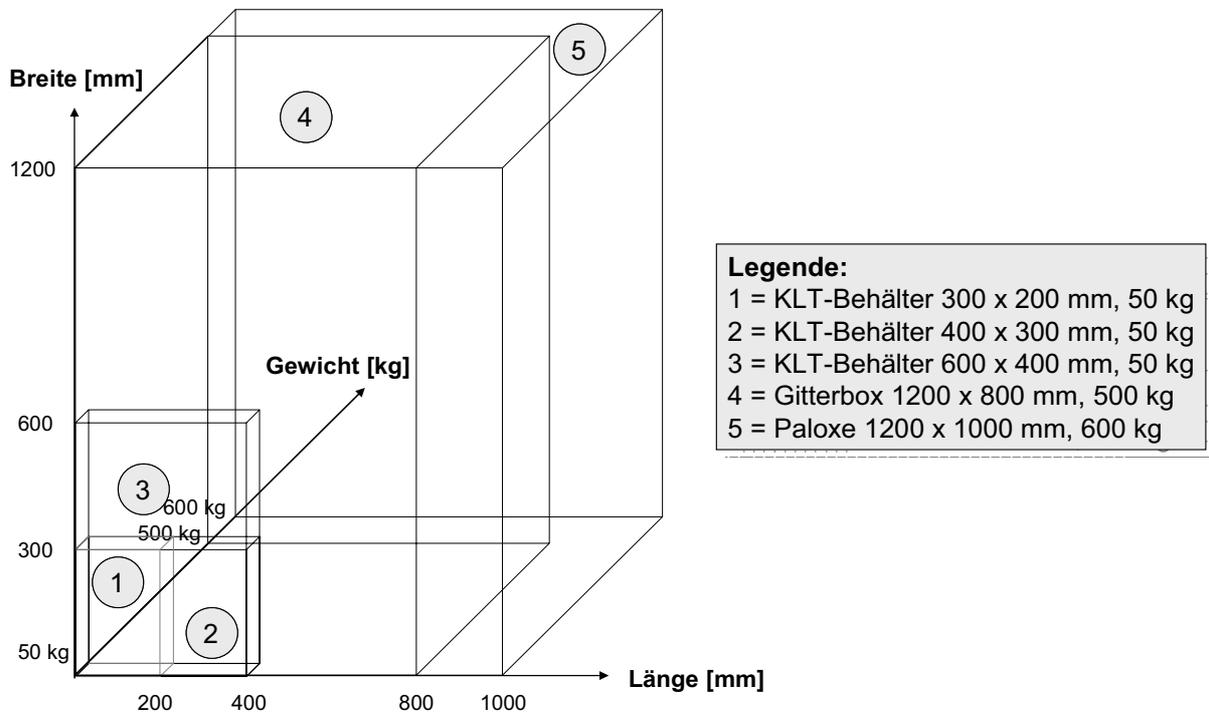


Abbildung 5-10: Einteilung der Ladehilfsmittel nach Abmaße und Gewicht am Beispiel geschlossener Behälter

### 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.

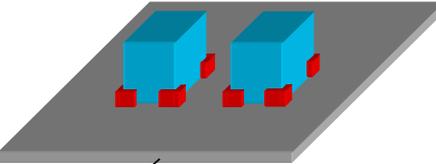
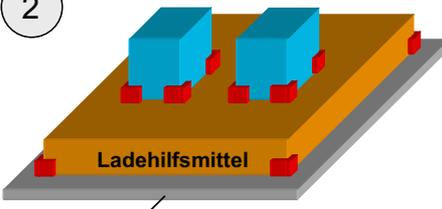
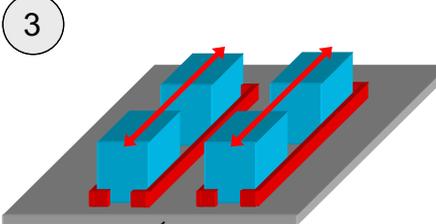
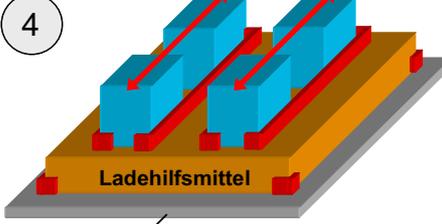
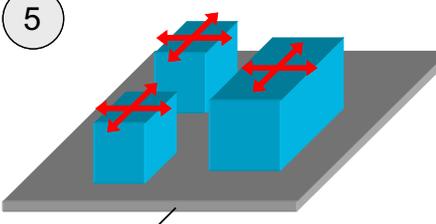
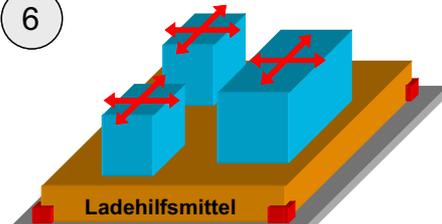
| Behälter-<br>handlung<br>Anzahl und<br>Größe | Durch Lastaufnahmemittel<br>selber   | Durch zusätzliches<br>Ladehilfsmittel   |
|--|--|---|
| Anzahl und<br>Größe fest                     | <p>①</p>  <p>—<br/>Lastaufnahmemittel</p>   | <p>②</p>  <p>—<br/>Lastaufnahmemittel</p>   |
| Anzahl und<br>Größe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

Abbildung 5-11: 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 5-11).



Fall 6: FTF mit Trägerpalette



Fall 4: FTF mit Rollenbahn als Lastaufnahmemittel

Abbildung 5-12: Ausführungsbeispiele für die Kategorisierung der Flexibilität des Greifbildes in Anlehnung an Fälle aus Abbildung 5-11

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 Übergabepunkte angepasst werden müssen.

### 5.2.4 Wandelbarkeitspotenzial

Falls das eingeplante Flexibilitätspotenzial nicht ausreicht, bedarf es einer Potenzialerhöhung durch eine Erweiterung des bestehenden Systems oder eine 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 5-13 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).

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

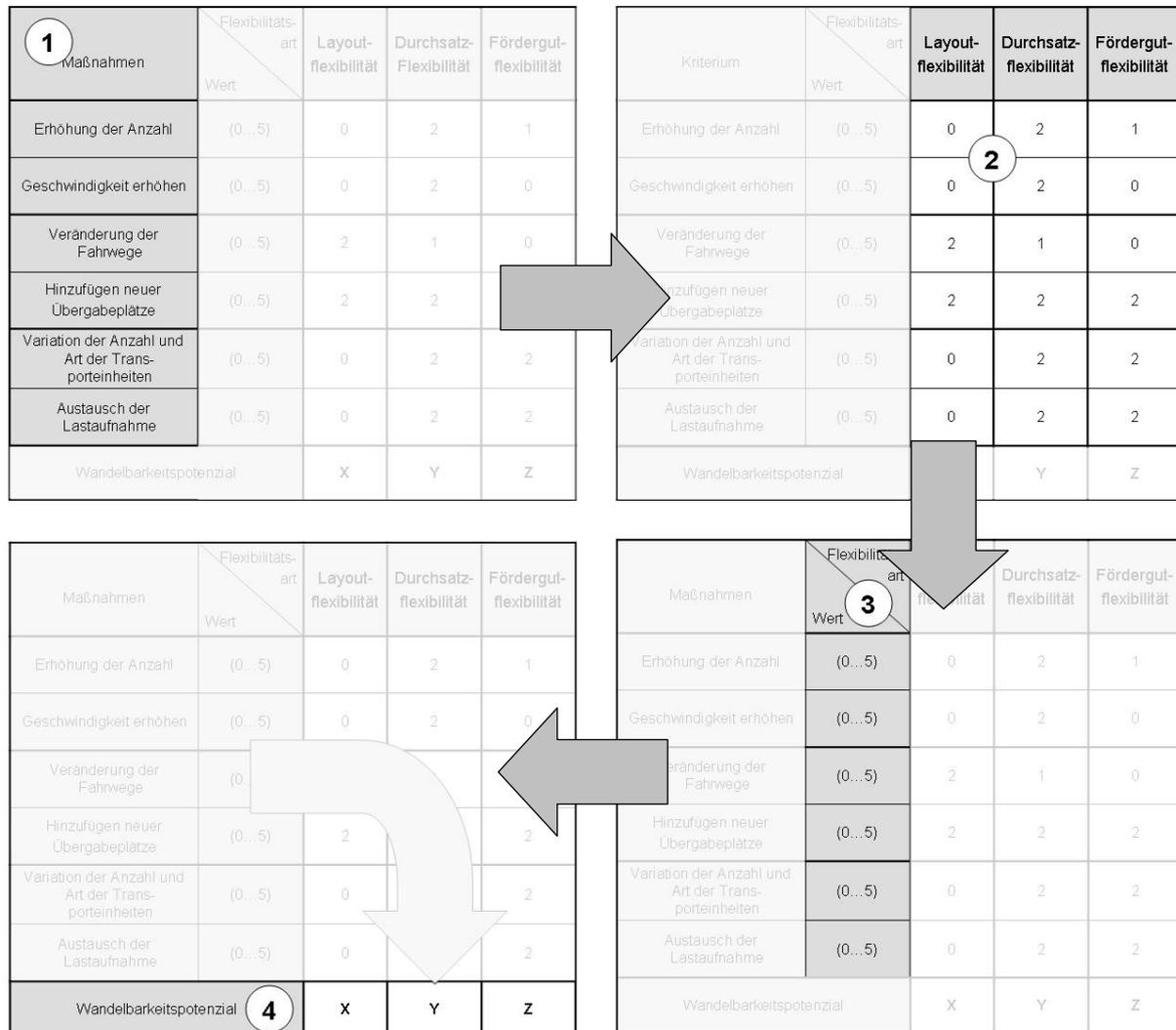


Abbildung 5-13: Vorgehensweise bei der Potenzialabschätzung von wandelbaren Materialflusssystemen

Beispielhaft an der Materialflussfunktion „Transportieren“ sind in Tabelle 5-10 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 2.2.2.1). 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 Übergabepunkte                     | ●                  | ●                     | ●                     |
| Transporteinheit                    | Variation der Anzahl und Art der Transporteinheiten | ○                  | ●                     | ●                     |
|                                     | Austausch der Lastaufnahme                          | ○                  | ●                     | ●                     |

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

Tabelle 5-10: 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 Num-

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

mer 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 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 5-14).

| Rollenbahn  |                       |                         |                            |                            | Elektrohängebahn                                    |                       |                         |                            |                            |
|---|-----------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|---|-----------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Maßnahmen   | Flexibilitäts-<br>art | Layout-<br>flexibilität | Durchsatz-<br>flexibilität | Fördergut-<br>flexibilität | Maßnahmen   | Flexibilitäts-<br>art | Layout-<br>flexibilität | Durchsatz-<br>flexibilität | Fördergut-<br>flexibilität |
|   | 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                             |                       | 12                      | 19                         | 12                         | Wandelbarkeitspotenzial                             |                       | 16                      | 41                         | 30                         |

Abbildung 5-14: 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).

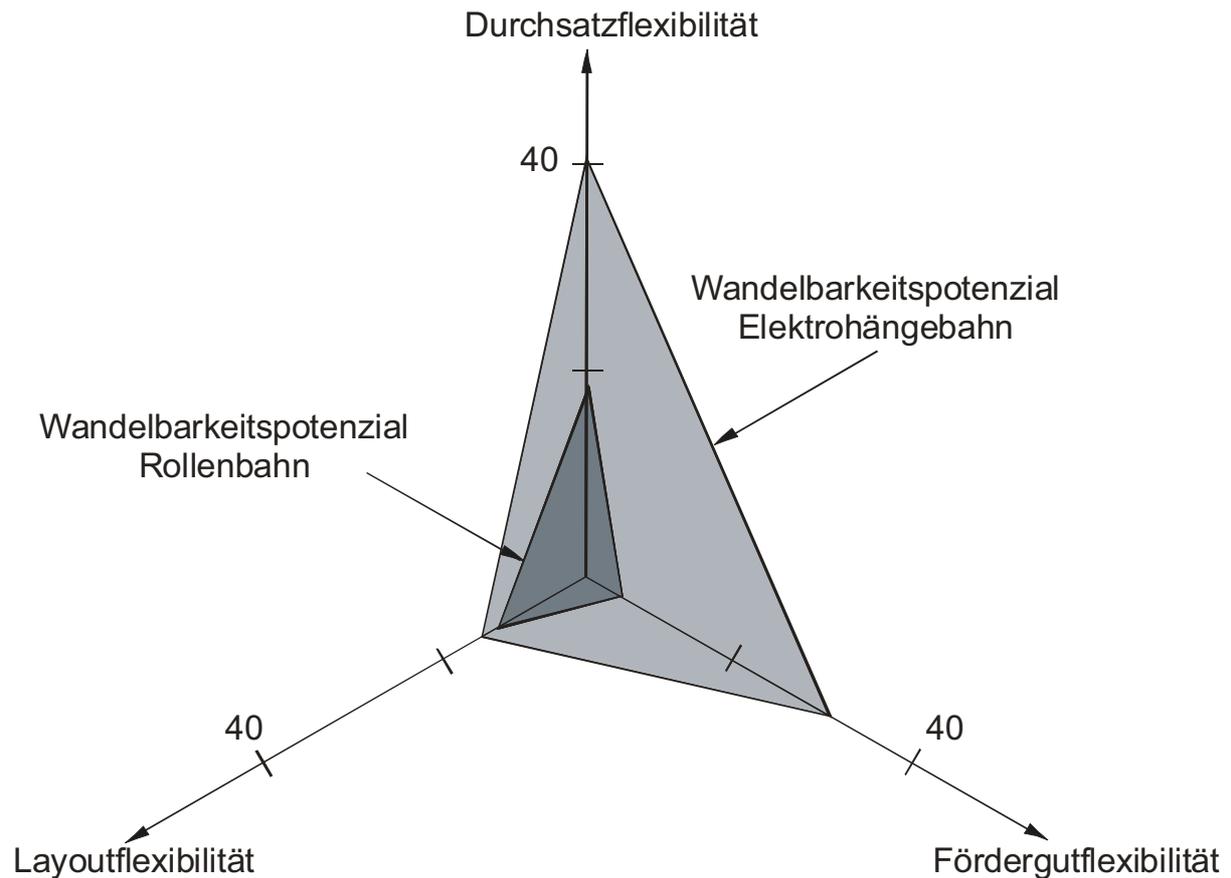


Abbildung 5-15: Graphische Darstellung des Wandelbarkeitspotenzials bei einer Rollenbahn und einer Elektrohängebahn

Die Veränderung der Fahrwege gestaltet sich bei beiden Systemen als schwierig. Das Hinzufügen von Übergabepunkten 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).

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

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 5-15 graphisch aufbereitet.

|           |                             | Layoutflexibilität | Durchsatzflexibilität | Fördergutflexibilität |
|-----------|-----------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| <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 5-11: 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 5-11 und Abbildung 5-16 dargestellt.

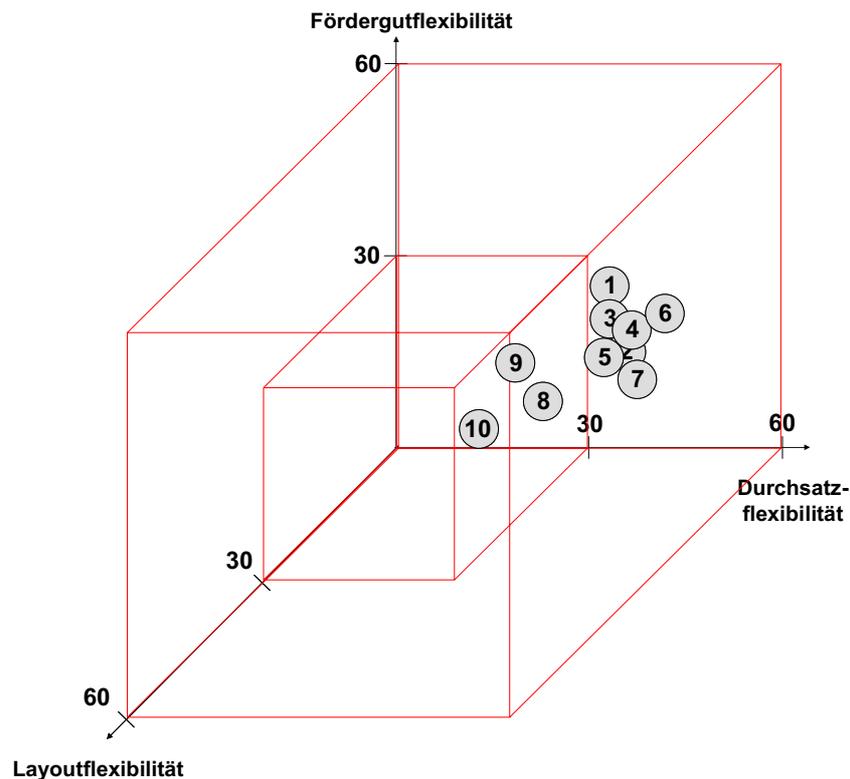


Abbildung 5-16: Graphische Darstellung des ermittelten Wandelbarkeitspotenzial für ausgewählte Transportmittel

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 unge-

planter 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.

### **5.3 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 4.2.3 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 zusammenzusetzen 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.

# 6 Modulare Materialflusssysteme

## 6.1 Modulare Fabrikstrukturen

Um den marktseitig vorgegebenen Zeit und Kostendruck zu begegnen und die zunehmend benötigte Flexibilität in der Produktion zu begegnen, unternahmen Produktionsunternehmen in jüngerer Vergangenheit neben technischen Veränderungen insbesondere auch vielfältige organisatorische Bemühungen. In der neueren Organisationslehre finden sich zahlreiche Konzepte, die unter den Schlagwörtern modulare [Wil-98a], fraktale [War-92], bionische [Ued-97], holonische [vBr-00], agile [Wil-98b] oder vitale Fabrik zusammengefasst werden können und zwischenzeitlich in umfangreichen Maße in der betrieblichen Praxis implementiert sind.

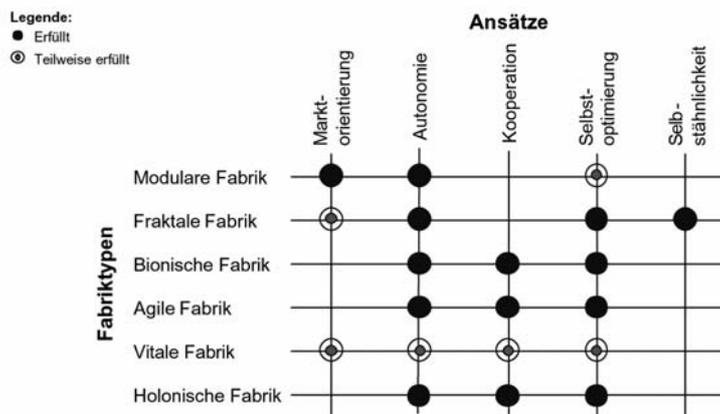


Abbildung 6-1: Moderne Organisationskonzepte und deren Charakteristika (nach [Wes-98b])

In Abbildung 6-1 sind die einzelnen Fabrikkonzepte den zugrunde liegenden Ansätzen, die im Folgenden kurz erläutert werden, zugeordnet. Unter Marktorientierung wird in diesem Zusammenhang die Ausrichtung der Fabrik nach dem Absatzmarkt verstanden. Westkämper versteht unter Autonomie die Entscheidungs- und Handlungsfreiheit eines abgegrenzten Bereichs innerhalb einer Gesamtstruktur [Wes-98b]. Als Kooperation wird vor allem das Zusammenspiel mit unternehmensexternen Zulieferern verstanden. Durch eine Konzentration auf das Kerngeschäft, eine angepasste Fertigungstiefe und sich ersetzende Zulieferer, werden positive Auswirkungen auf das Unternehmen erwartet. Der Punkt der Selbstorganisation und -optimierung

fokussiert darauf, dass die organisatorische Einheit befugt ist, die Ablauf- und Aufbauorganisation zu ändern. Die Selbstähnlichkeit beschreibt die Ähnlichkeit von organisatorischen Einheiten. Hierdurch sollen einheitliche Schnittstellen zwischen den Organisationseinheiten minimiert werden.

Die aufgeführten Ansätze lassen sich im Wesentlichen auf zwei organisatorische Gestaltungsansätze zurückführen:

- Die Bildung kleiner, in den meisten Fällen produktorientierter Produktionseinheiten (-segmente)
- Eine weitgehende Dezentralisierung und Aufgabenintegration produktionsnaher indirekter Tätigkeiten in den Produktionssegmenten

Ziel der verfolgten Ansätze ist es, durch eine Erhöhung der Eigenverantwortung und Selbstorganisation kostengünstiger zu produzieren sowie schneller auf Turbulenzen reagieren zu können [Wes-98a].

In letzten Jahren haben sich Ansätze auf dem Gebiet der Modularisierung in Bezug auf die Gestaltung von Produktionssystemen erfolgreich in der Praxis etabliert. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit der weitere Fokus auf dem Ansatz der Modularisierung gerichtet werden und die bestehende Implementierung auf ihre Tauglichkeit überprüft sowie auf Materialflusssysteme übertragen werden.

Ziel dieses Kapitels „Modulare Fabrikstrukturen“ ist es, einen Überblick über die hauptsächlich aus der Produktionsplanung 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.

### **6.1.1 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].

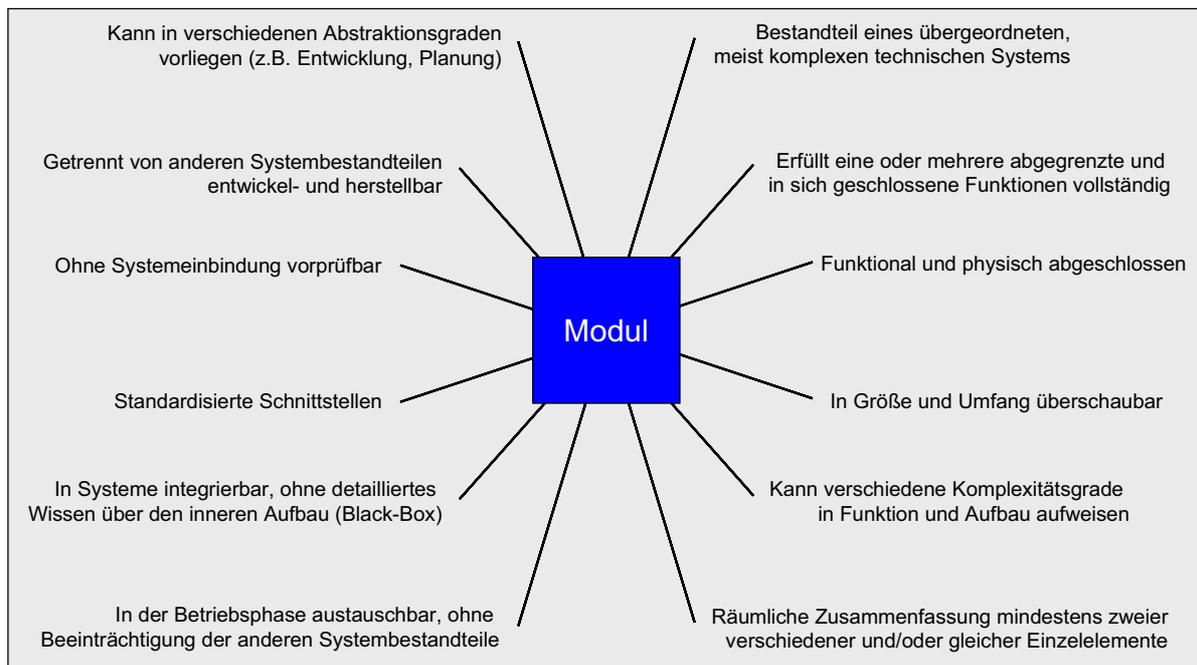


Abbildung 6-2: Allgemeine Eigenschaften und Beschreibungsmerkmale eines Moduls [Hil-05]

In Abbildung 6-2 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.

### 6.1.2 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-01a]. 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 6-1).

| <b>Gestaltungsbereiche</b> |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|
|                            | Betriebsmittel (B)   | Organisation (O)   | Raum- und Gebäude-technik (R)  |
| Fabrikelemente             | <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 6-1: Gestaltungsbereiche mit den entsprechenden Fabrikelementen einer modulare Fabrikstruktur (nach [Wie-03b])

Ein Fabrikmodul, das sich aus den in Tabelle 6-1 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

- 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 6-3 ist die hierarchische Strukturierung einer Fabrik in die Ebenen Einzelplatz, Gruppe, Bereich, Generalstruktur und Standort dargestellt.

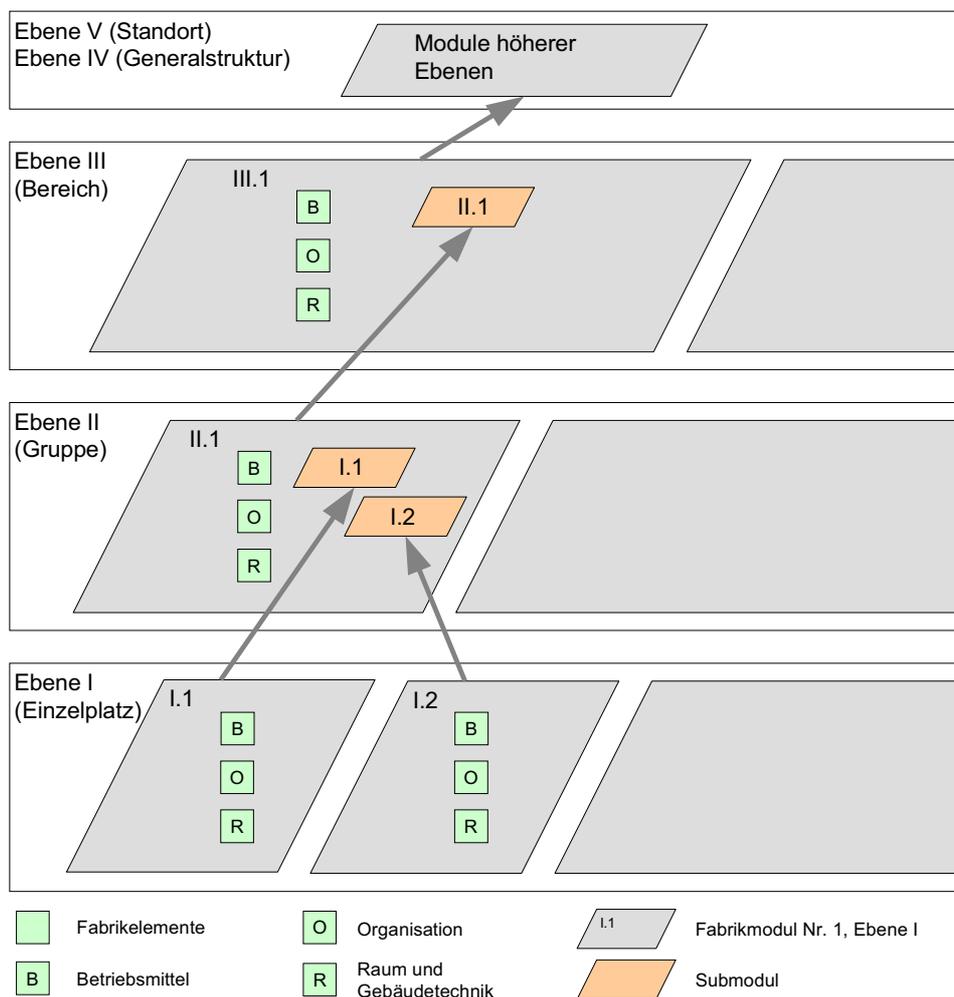


Abbildung 6-3: Hierarchie-Ebenenmodell einer modularen Fabrik (nach [Wie-05])

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 organi-

satorisch 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 [Wie-05].

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 Sys-

tem 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 6-2 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 6-2: 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 6-4 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.

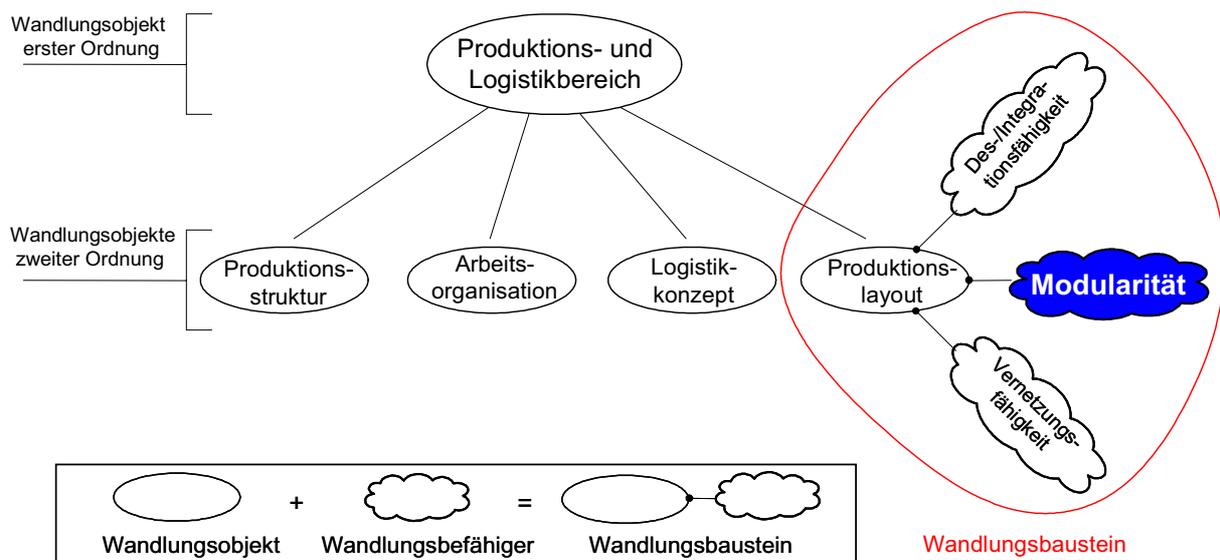


Abbildung 6-4: Entstehung von Wandlungsbausteinen

Das Vorhandensein von Wandlungsbausteinen in einem System befähigt es zwar, sich zu wandeln, es handelt sich allerdings um ein noch ungerichtetes Potenzial und sagt nichts über tatsächlich stattfindende Wandlungsprozesse aus. Ein solcher kann durch einen Anstoß von innerhalb oder außerhalb des Unternehmens induziert werden und aktiviert die entsprechenden Wandlungsbausteine, um einen erneuten Gleichgewichtszustand zwischen der Fabrik und ihrer Umwelt herzustellen.

Im Rahmen des Teilprojektes „Modellierung und Planung adaptiver Fabrikstrukturen“ des Bayerischen Forschungsverbundes ForLog wurde zur Planung supra-adaptiver Logistiksysteme ein Modularisierungsansatz entwickelt. Dieser Ansatz sieht vor, Prozesse mit Hilfe einzelner Technikmodule, die in Produktions- und Logistikmodule aufgeteilt sind, abzubilden und in weiteren Aggregationsstufen zu Prozessmodulen zusammenzufassen [Gün-05c], [Gün-06a]. Dieser Ansatz ist für die Logistikplanung ab Zellenebene anwendbar und wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit im folgenden Kapitel 6.2 um die Aspekte der Steuerungstechnik sowie hinsichtlich der technischen Detailplanung von Materialflusssystemen nach „unten“ erweitert.

In seiner Dissertation zur Entwicklung einer verteilten und adaptiven Materialflusssteuerung definierte und entwickelte Lorentz Materialflussmodule für den Stückguttransport [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 von Lorentz aufgestellte Modularisierungstheorie mit einzelnen Materialflussmodulen bildet eine Grundlage für die weitere Betrachtung. Den Ansatz von Lorentz, der nur auf den Rollenförderer angewendet wurde, gilt es in den weiteren Betrachtungen auf Allgemeingültigkeit weiterzuentwickeln und auf alle weiteren Materialflusssysteme zu übertragen.

Alle beschriebenen wissenschaftlichen Ansätze und Beschreibung für modulare Strukturen haben gemeinsam, dass diese in einem ersten Schritt durch eine hierarchische Strukturierung der Fabrikprozesse eine Komplexitätsreduzierung hervorrufen wollen. Mit dem Einsatz von Modulen wird in allen Ansätzen versucht, durch gezielte Eingriffe, z.B. durch Hinzufügen oder Wegnahme einzelner Module, direkt auf Veränderungen 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.

### 6.2 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.

#### 6.2.1 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 6-5) [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.

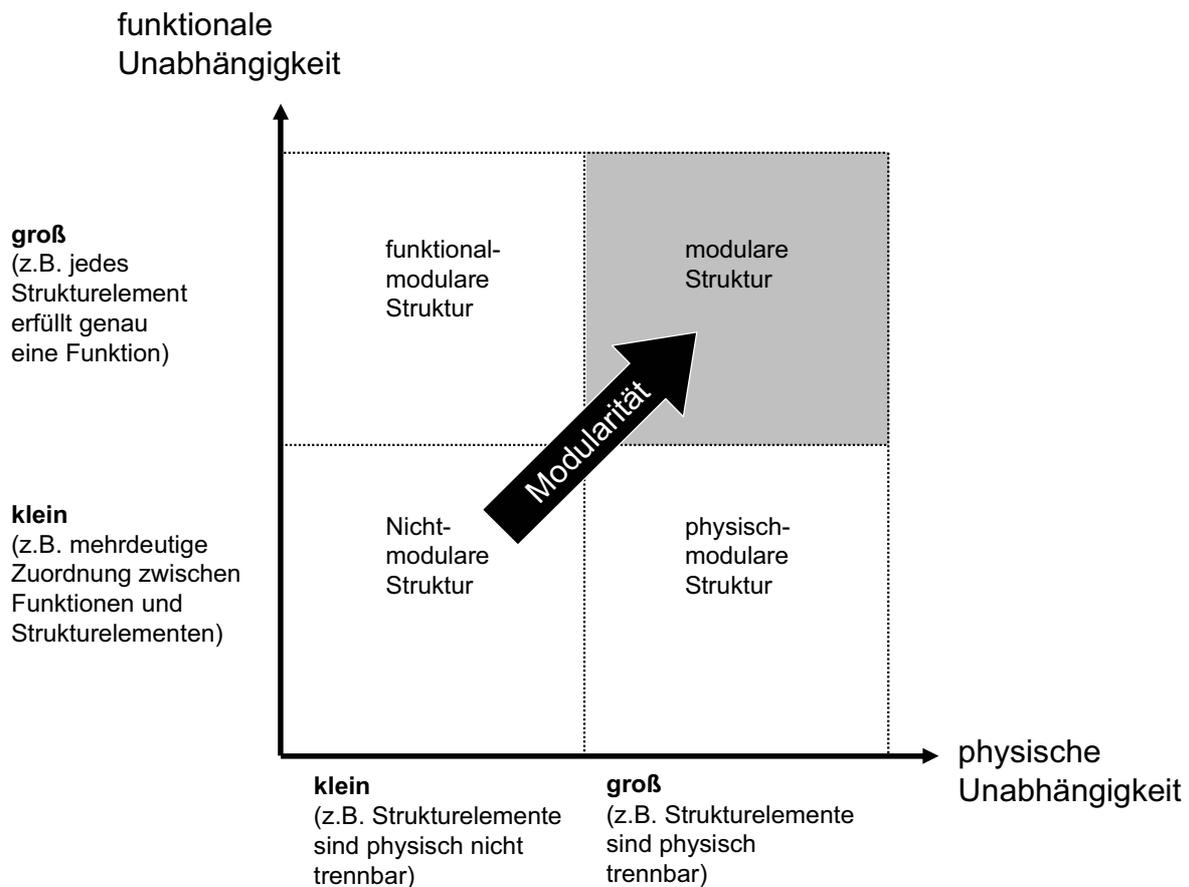


Abbildung 6-5: Zusammenhang zwischen Modularität sowie physischer und funktionaler Abhängigkeit (nach [Koh-97])

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 6-3 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 6-3: Kriterien für eine funktionsorientierte Modularisierung (nach [Wil-06])

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.

### 6.2.2 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 6.1.2) angewandt wird. Alle in einem Fabrikssystem auftretenden Prozesse, bei denen der Materialfluss eine Rolle spielt, werden so in hierarchischer Form strukturiert. Abbildung 6-6 zeigt eine mögliche Strukturierung der in einem System auftretenden Prozesse. Diese Vorgehensweise erfolgt in starker Anlehnung an die allgemeine Systemtheorie (vgl. Kapitel 2.1), die ebenfalls u.a. einen hierarchischen Aufbau eines Systems darstellt.

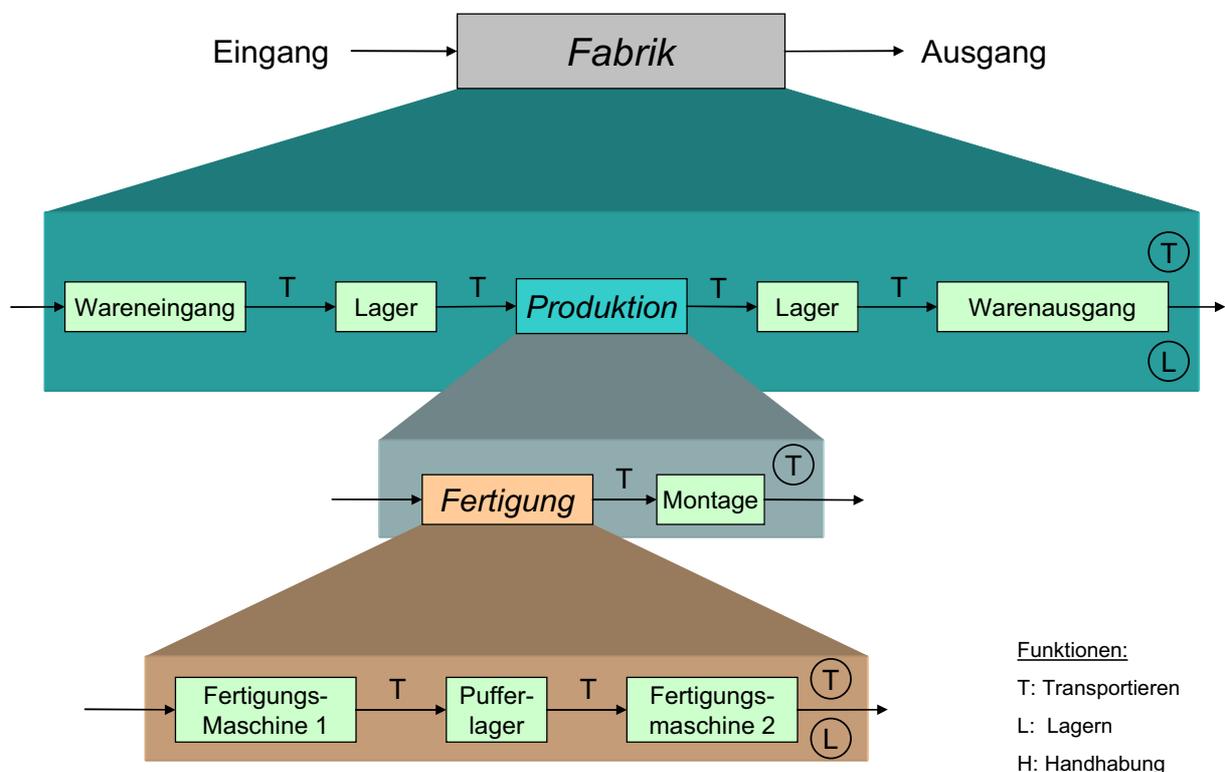


Abbildung 6-6: Einordnung der Funktionen im Hierarchieebenenmodell eines Materialflusssystemes

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 2.2.2 beschrieben, stehen für die Durchführung von Materialflussoptionen 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.

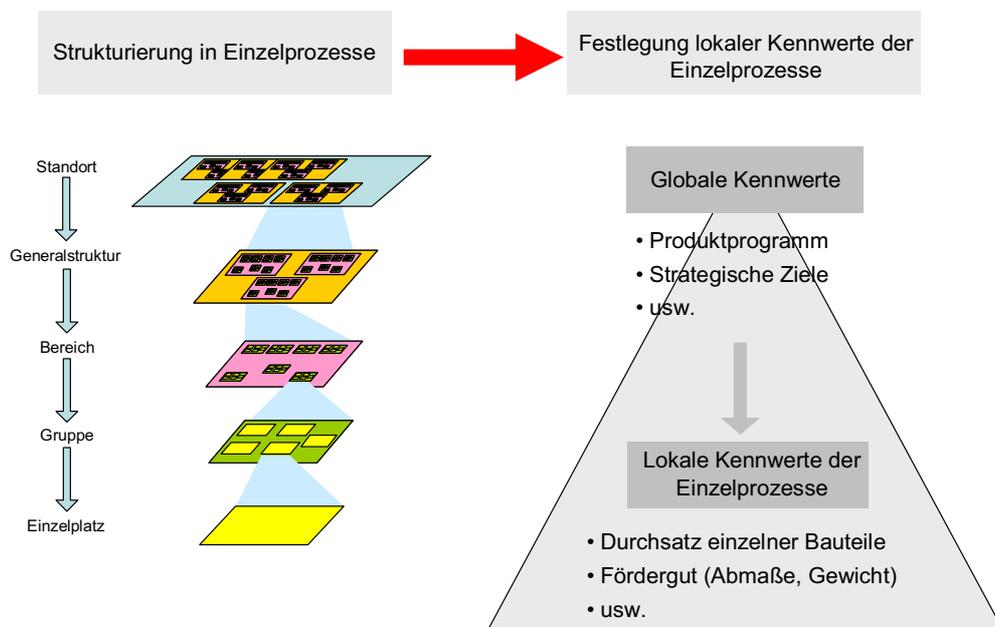


Abbildung 6-7: Vorgehensweise bei der Bildung von lokalen Kennwerten

In Abbildung 6-7 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 6-4) 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> | <br>[mm]<br>[kg] |
| Daten Ladungsträger (falls festgelegt):   |                  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Typ</li> <li>• Abmessung</li> <li>• Gewicht</li> <li>• Füllungsgrad</li> </ul>   | <br>[mm]<br>[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><br>[1 – 2] <sup>(2)</sup> |
| Durchsatzflexibilität <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchsatzreserve</li> <li>• Richtungsflexibilität</li> </ul>   | [LE/h]<br>[1 – 2] <sup>(3)</sup>                 |
| Fördergutflexibilität <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilität des Greifbildes</li> <li>• Verwendung von Standardladehilfsmittel</li> </ul>  | (4)<br>(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> |  |
| <b>Legende:</b><br>(1): Kriterien gemäß Abbildung 5-7<br>(2): Kriterien gemäß Abbildung 5-8<br>(3): Kriterien gemäß Abbildung 5-9<br>(4): Kriterien gemäß Abbildung 5-11<br>(5): Kriterien gemäß Abbildung 5-10   |  |

Tabelle 6-4: 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 3.2.1), werden durch die lokalen Kennwerte zusätzlich die Anforderungen an die Flexibilität mit berücksichtigt. Diese setzen sich, wie in Kapitel 5.2 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.

### 6.2.3 Methodik der Modularisierung

#### 6.2.3.1 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 6-8 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.

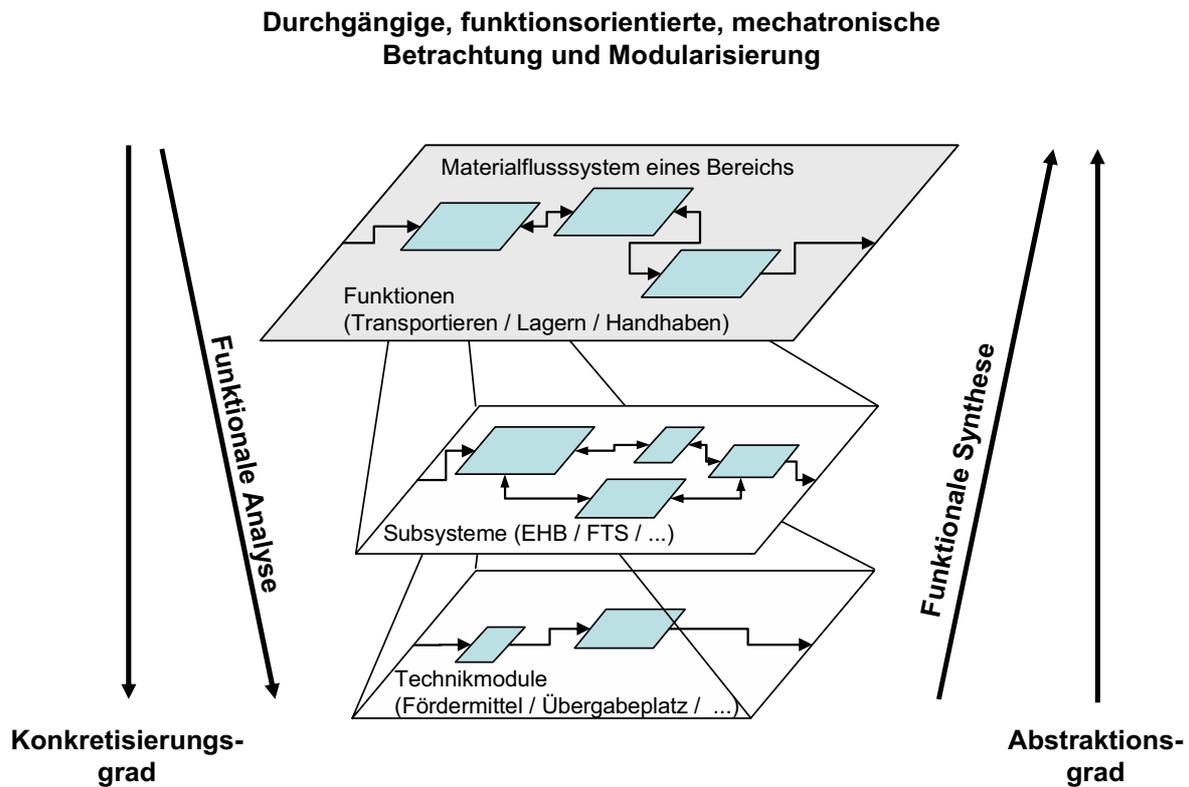


Abbildung 6-8: Funktionsorientierte Modularisierung eines Materialflusssystemes

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 5.1.2). Eine Vorauswahl der zur Erfüllung der Materialflussfunktion geeigneten Subsysteme erfolgt anhand der gestellten Flexibilitätsanforderungen. Die Charakteristik und die Eigenschaften von Subsystemen ist in Tabelle 6-5 dargestellt.

| <b>Subsystem</b>  |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfüllung einer der drei Materialflussfunktionen Transportieren, Lagern oder Handhaben</li> <li>• Bestandteil eines Materialflusssystems 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 6-5: 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 Übergabeplätze 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 6-8). 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.

### 6.2.3.2 Struktur der Technikmodule

Bei der Betrachtung der Technikmodule wird auf den Ansatz von Lorentz, der in Kapitel 6.1.2 vorgestellt wurde, aufgebaut. Die von Lorentz 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 Modularisierungsansatz orientiert sich im wesentlichen auf die im Kapitel 2.2.2 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 6-3 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 6-6 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.

| Technikmodul   |
|--|
| <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 6-6: Charakteristik und Eigenschaften eines Technikmoduls

Für die Funktion „Transportieren“ erfolgt gemäß der Bestandteile eines Transportsystems und deren auszuführenden Funktionen (vgl. Kapitel 2.2.2.1) eine Strukturierung in die Technikmodule Transportmittel (Teilfunktion: Transport von A nach B), Transportstrecke (Teilfunktion: Fahrweg) und Übergabepplätze (Teilfunktion: Speichern) (vgl. Abbildung 6-9). 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.

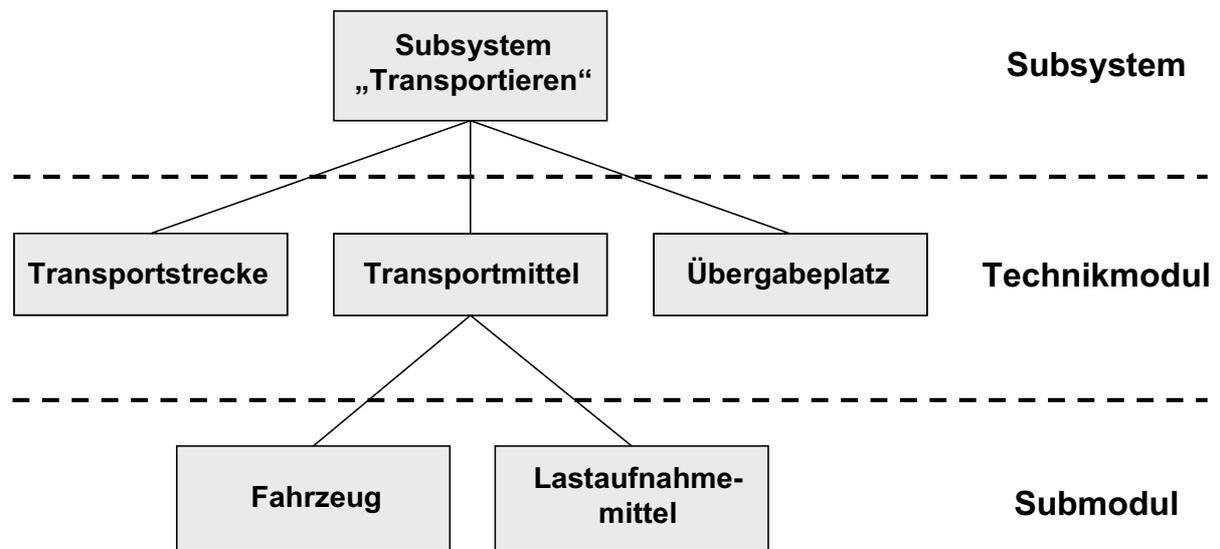


Abbildung 6-9: Technikmodule der Funktion „Transportieren“

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 2.2.2.2) eine Strukturierung in die Technikmodule Lagerereinrichtung (Teilfunktion: Speichern der Lagereinheiten) und Lagerbedienug. Bei der Betrachtung des Technikmoduls Lagerbedienug 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 doppeltiefer Einlagerung sollen die einzelnen Technikmodule beschrieben werden. Die Lagerbedienug wird durch einen Mast mit einen Hub- und einem Fahrtrieb realisiert, der auf einer

Schiene fährt. Auf dem Hubbalken des Mastes ist ein Lastaufnahmemittel befestigt, das KLT-Behälter doppeltief Einlagern kann. Die Lagereinrichtung wird durch einen Regalbau realisiert, der parallel zur Fahrschiene verläuft und zwei Behälter hintereinander aufnehmen kann.

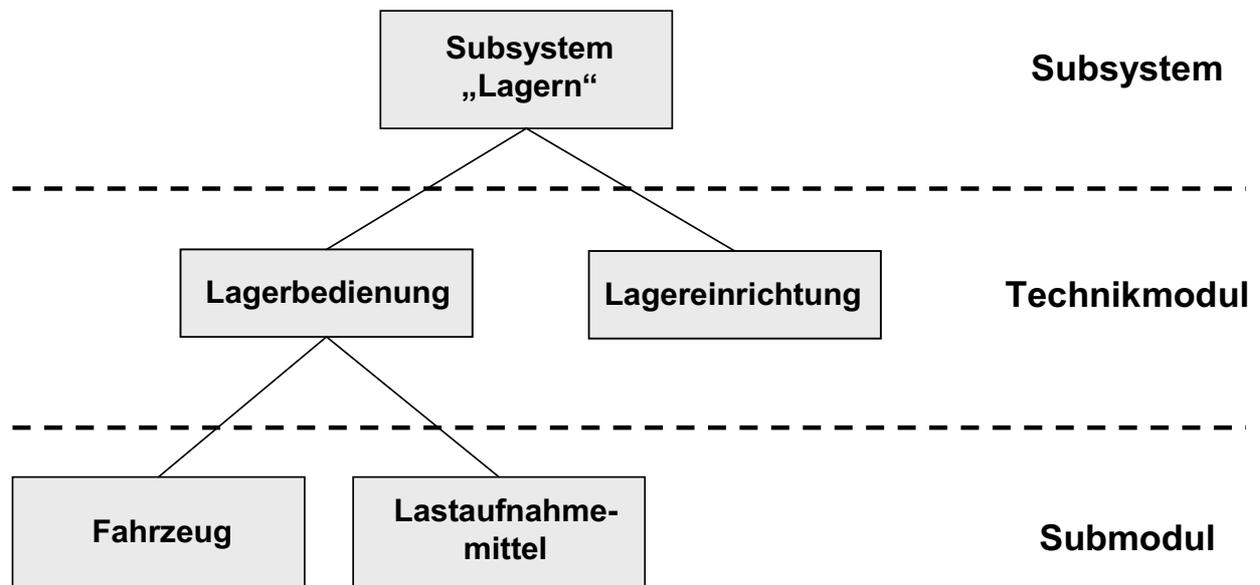


Abbildung 6-10: Technikmodule der Funktion „Lagern“

Wie bereits in Kapitel 2.2.2.3 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 6-11). 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.

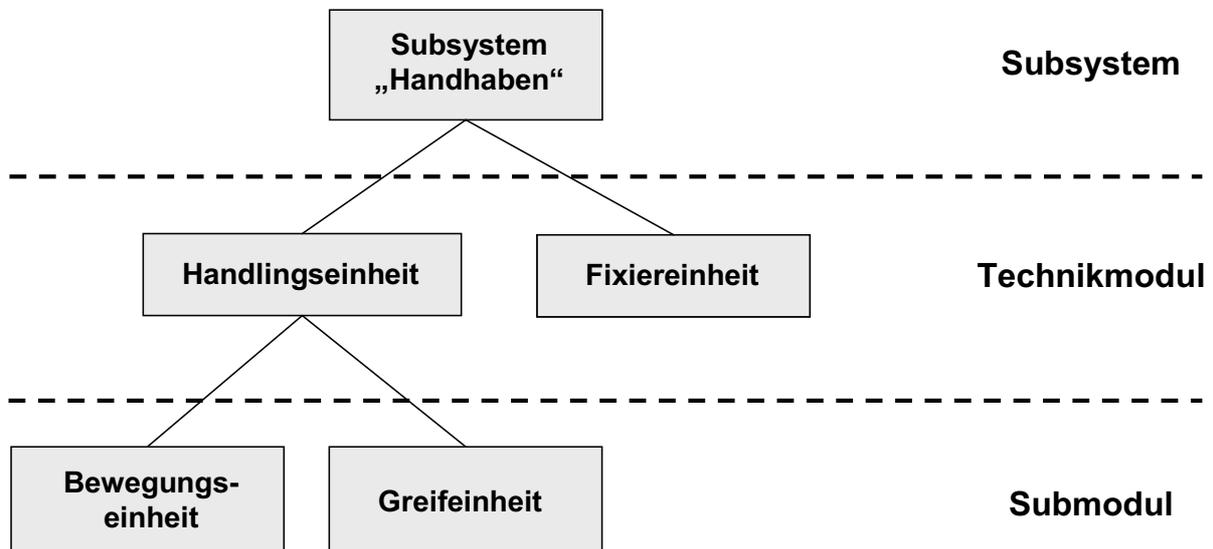


Abbildung 6-11: Technikmodule der Funktion „Handhaben“

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 vorgruppieren kann.

### 6.3 Zusammenspiel Modularisierung und Wandelbarkeit

Im vorangegangenen Kapitel 6.2 wurde eine Methodik zur Modularisierung von Materialflusssystemen erarbeitet und dargestellt. Ausgehend von den für den jeweiligen Prozess benötigten Materialflussfunktionen wurden auf Basis der Flexibilitätsanforderungen entsprechend 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 5.1.2). Die beiden möglichen Ansätze Erweiterungsfähigkeit und Integrationsfähigkeit sind in Abbildung 6-12 dargestellt.

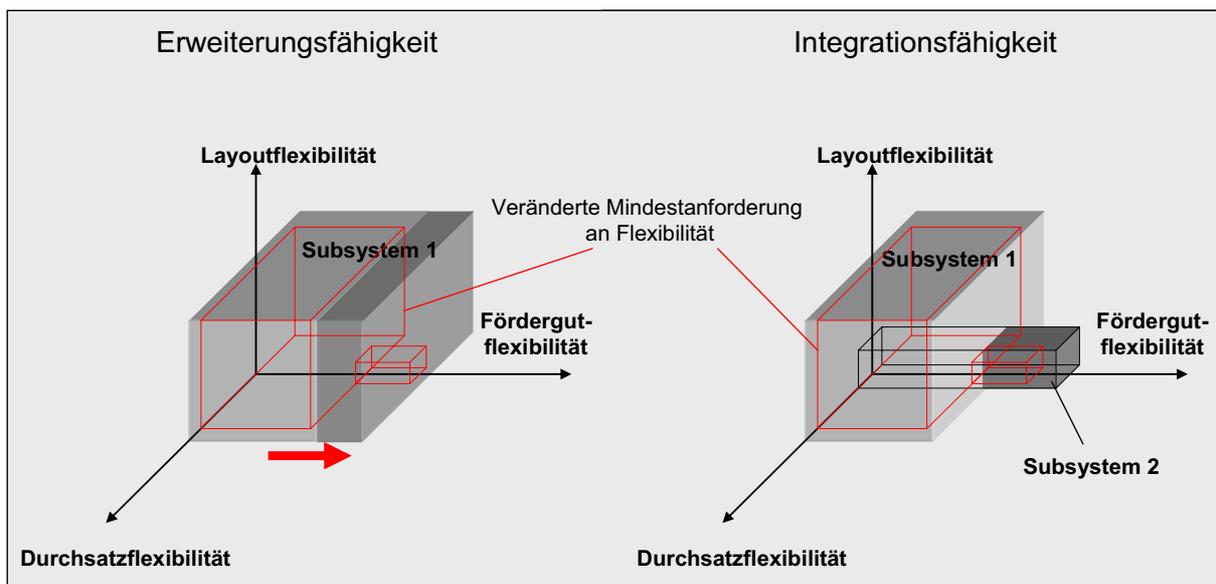


Abbildung 6-12: Möglichkeit einer Flexibilitätserhöhung durch modulare Materialflusssysteme

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 6-7 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 6-7: 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 6-12).

## 6.4 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 wurden in der Versuchsanlage des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München umgesetzt (siehe Abbildung 6-13).

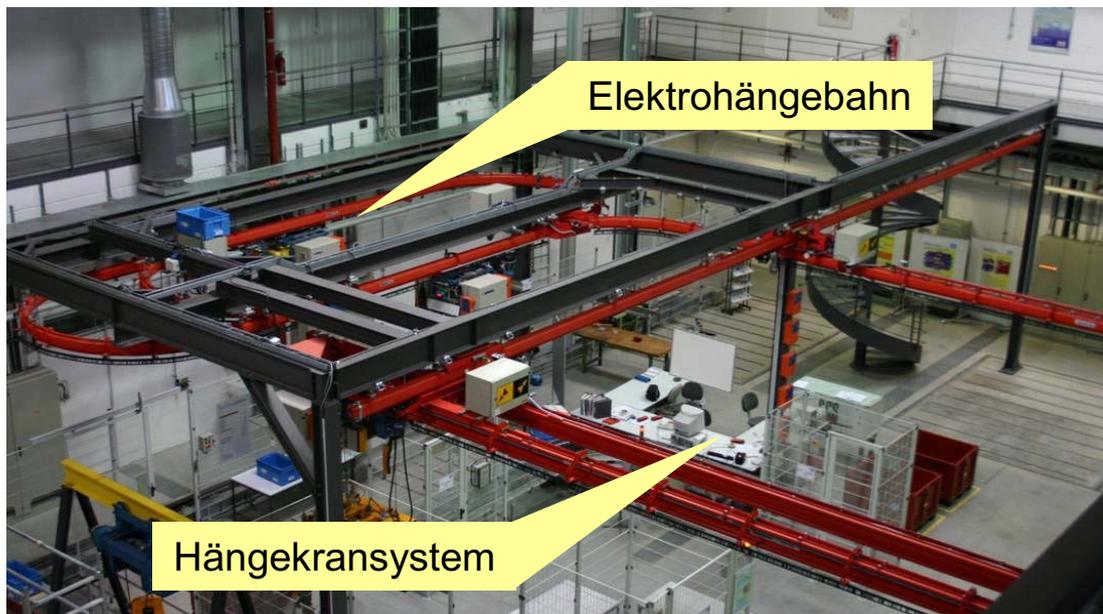


Abbildung 6-13: Versuchsanlage am Lehrstuhl fml

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 5-7). 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 6.2.3.2 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 Elektro-  
hängebahn sind in Tabelle 6-8 und Tabelle 6-9 alle in der Versuchsanlage eingesetz-  
ten 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>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>• Fahrschienen (Kurven, Geraden) unterschiedlicher Länge und Radien</li> <li>• Verzweigungen (Weichen, Kreuzungen,...)</li> <li>• Vertikale Umsetzeinrichtungen (Etagenförderer, Hub-/Senkstation)</li> </ul>                         |

Tabelle 6-8: Technikmodule für das Subsystem Elektrohängebahn

| 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 6-9: 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 6-14). 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.

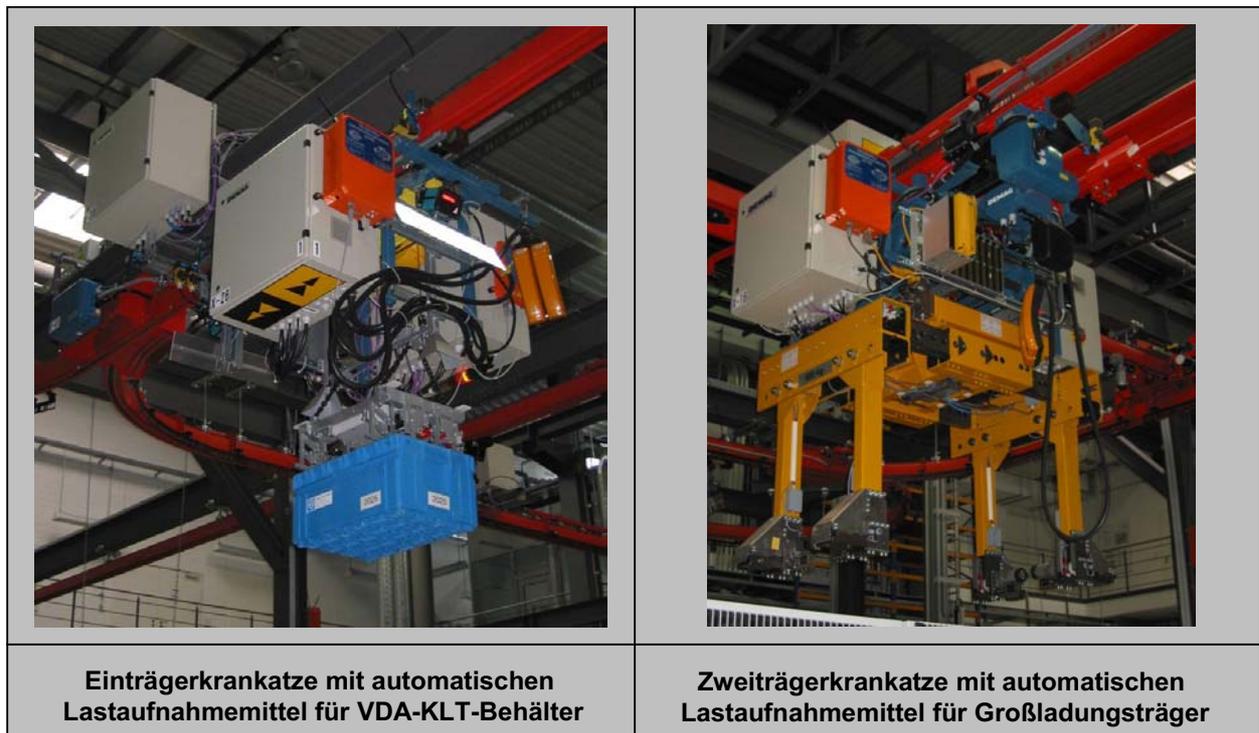


Abbildung 6-14: Transportmittel inkl. Lastaufnahmemittel

Die Übergabepätze 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 6-10 aufgeführten Eigenschaften besitzen.

Ausgehend von der aufgeführten Anforderungsliste wurden zwei grundsätzliche Konzepte für einen passiven und einen aktiven Übergabepatz entwickelt. Ein passiver Übergabepatz dient zur passiven Behälteraufnahme. Er zeichnet sich durch den einfachen Aufbau, einer damit verbundenen kostengünstigen Herstellung und durch seine Mobilität aus (vgl. Abbildung 6-15).

| <b>Eigenschaften Technikmodul Übergabepplatz</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 6-10: Eigenschaften des Technikmoduls Übergabepplatz

Der aktive Übergabepplatz 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 Übergabepplatz 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 6-15).

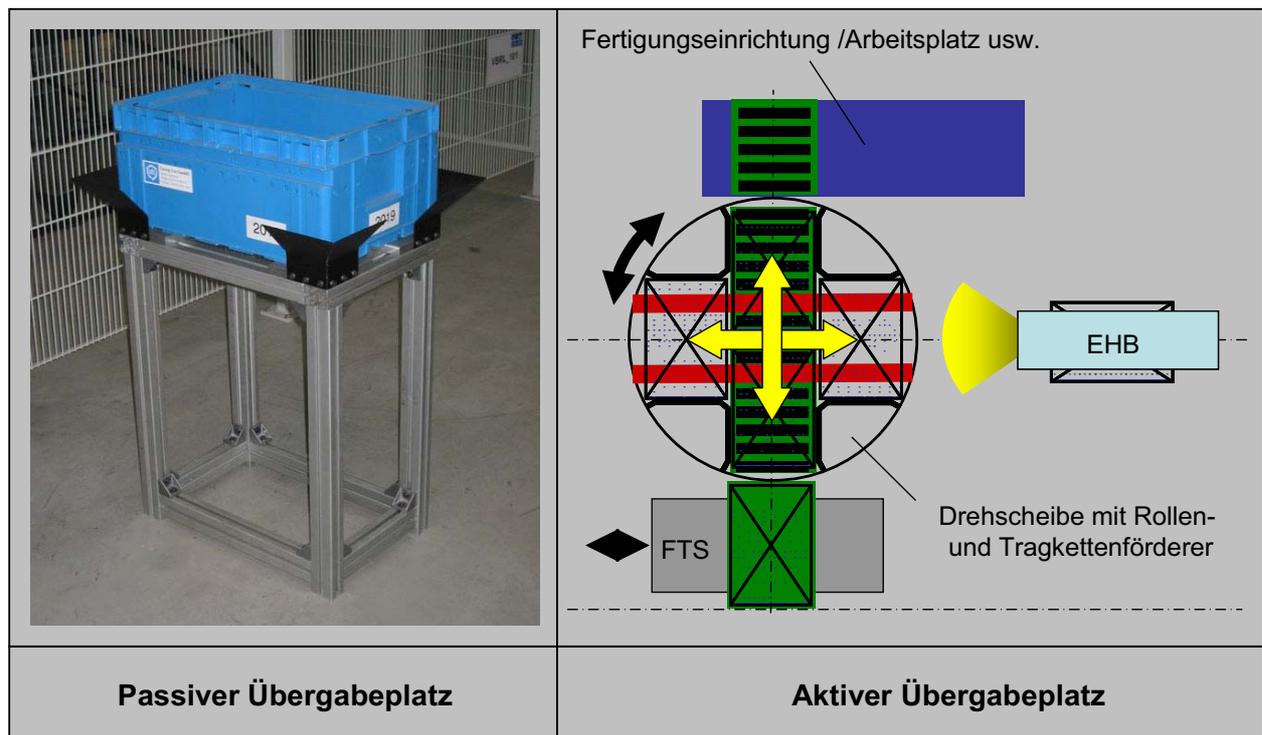


Abbildung 6-15: Ausführungsbeispiele von Übergabepätzen

Durch die Fähigkeit des aktiven Übergabepatzes, 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 Übergabepatz durch eine wesentliche höhere Fördergutflexibilität aus. Darüber hinaus bietet der aktive Übergabepatz eine höhere Durchsatzflexibilität, da gleichzeitig mehrere Behälter gepuffert werden können. In Punkto Layoutflexibilität zeichnen sich beide Überplätze durch ihre hohe Mobilität aus.

### 6.5 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 Sub-

systeme 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 funktionsorientierten 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.



## 7 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.

### 7.1 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.

### 7.1.1 Modulbeschreibung für Technikmodule

Die Charakteristik und Eigenschaften eines Technikmoduls wurden in Kapitel 6.2.3.2 ausführlich beschreiben (vgl. auch Tabelle 6-6). 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.

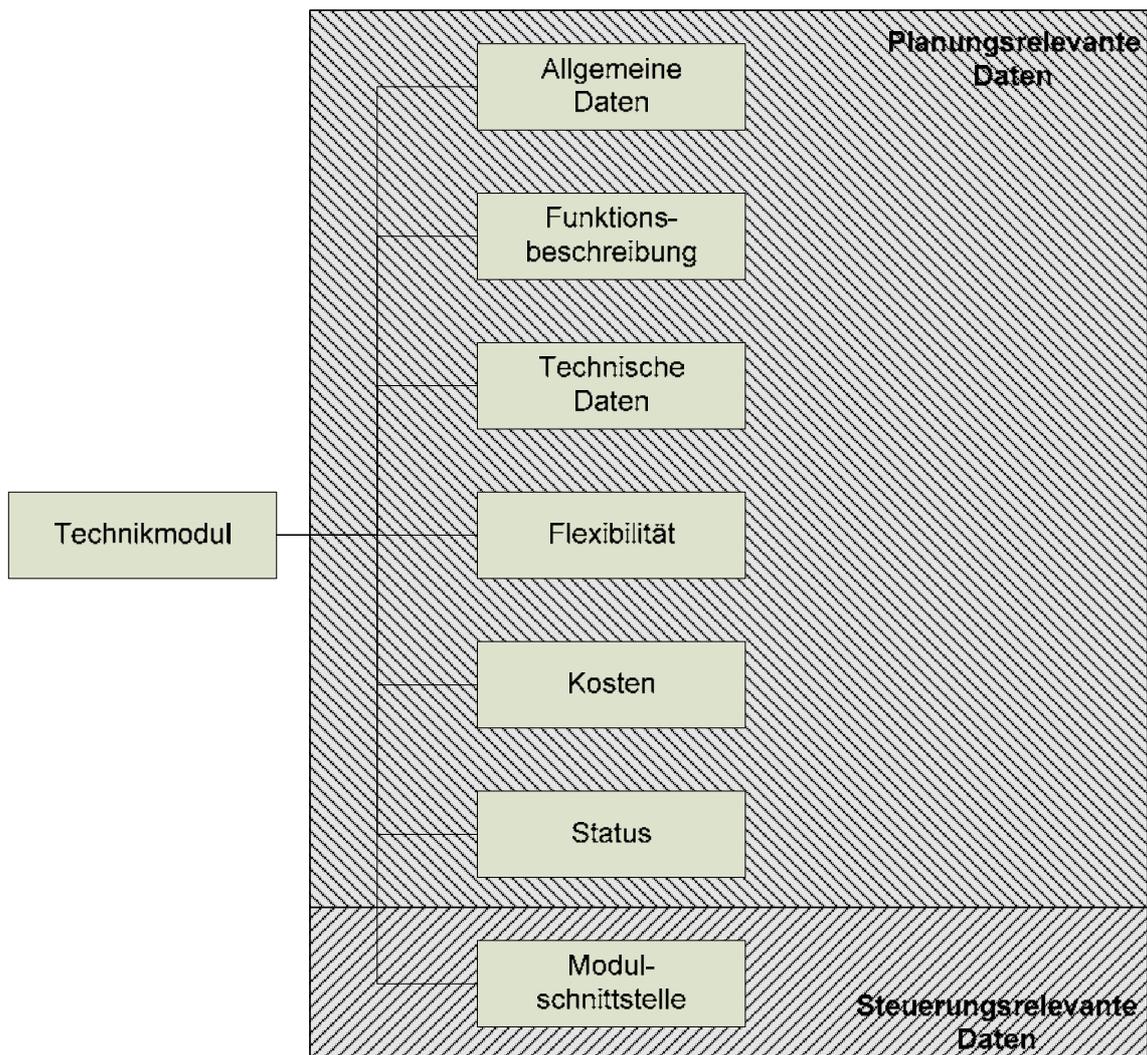


Abbildung 7-1: Aufbau und Struktur der Modulbeschreibung für ein Technikmodul

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 7-1).

### Allgemeine Daten

Unter dem Überpunkt „Allgemein“ werden allgemeine Informationen über das jeweilige Modul abgelegt (vgl. Abbildung 7-2). 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.

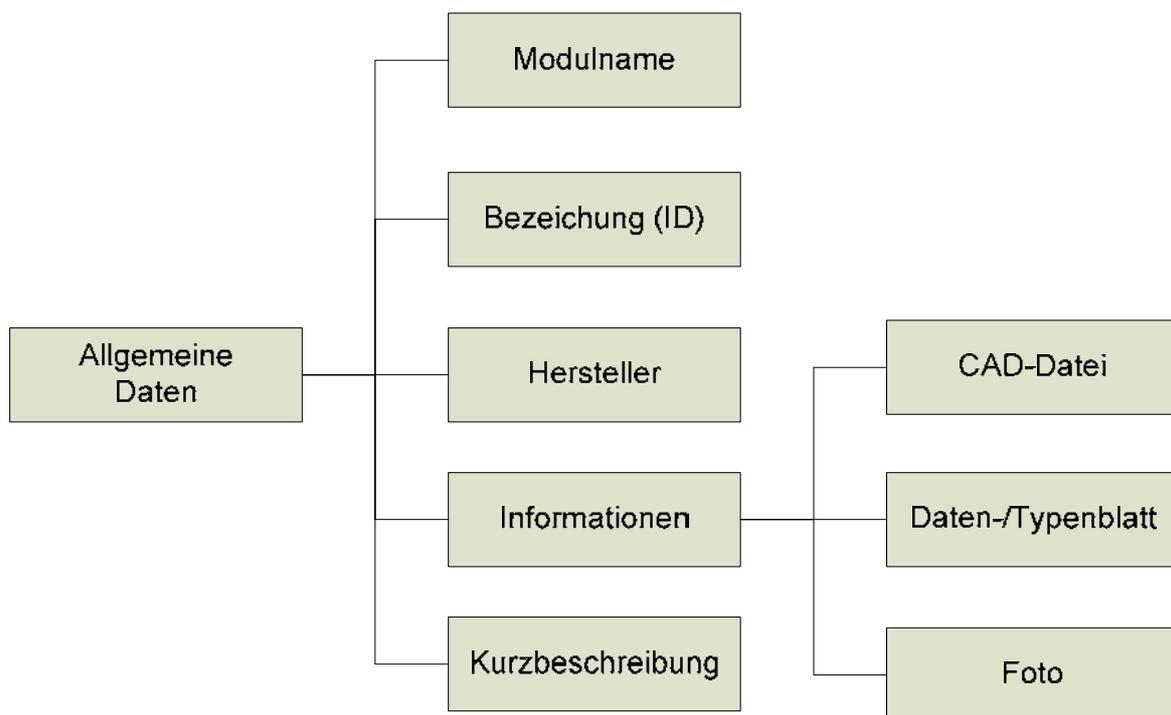


Abbildung 7-2: Datenstruktur für den Überpunkt „Allgemeine Daten“

### Funktionsbeschreibung

Der Überpunkt „Funktionsbeschreibung“ beinhaltet im Wesentlichen die Angabe der Materialflussfunktion, die diesem Technikmodul zugrunde liegt (vgl. Abbildung 7-3). 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 6.2.3.2), werden in diesem Fall alle Teilfunktionen aktiviert.

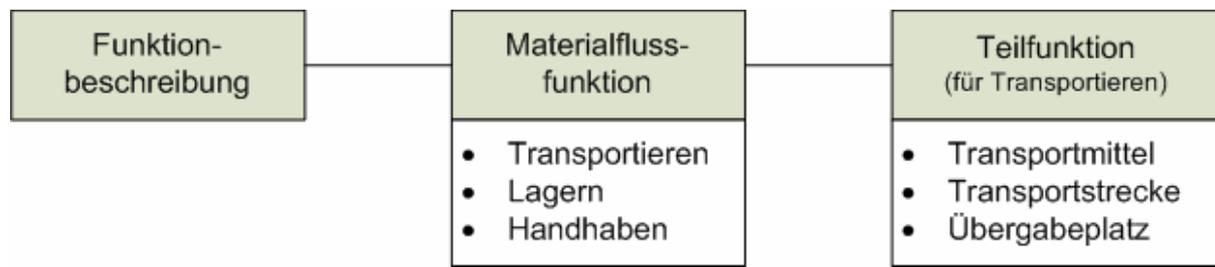


Abbildung 7-3: Datenstruktur für den Überpunkt „Funktionsbeschreibung“

### 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 7-4).

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 Bestimmung 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 Lastaufnahme und -abgabe (siehe Kapitel 6.4). Falls es sich um einen aktiven Übergabepunkt handelt, wird das Element <Puffergröße> aktiviert und dort die Eigenschaften und die Größe der Pufferfunktion beschrieben.

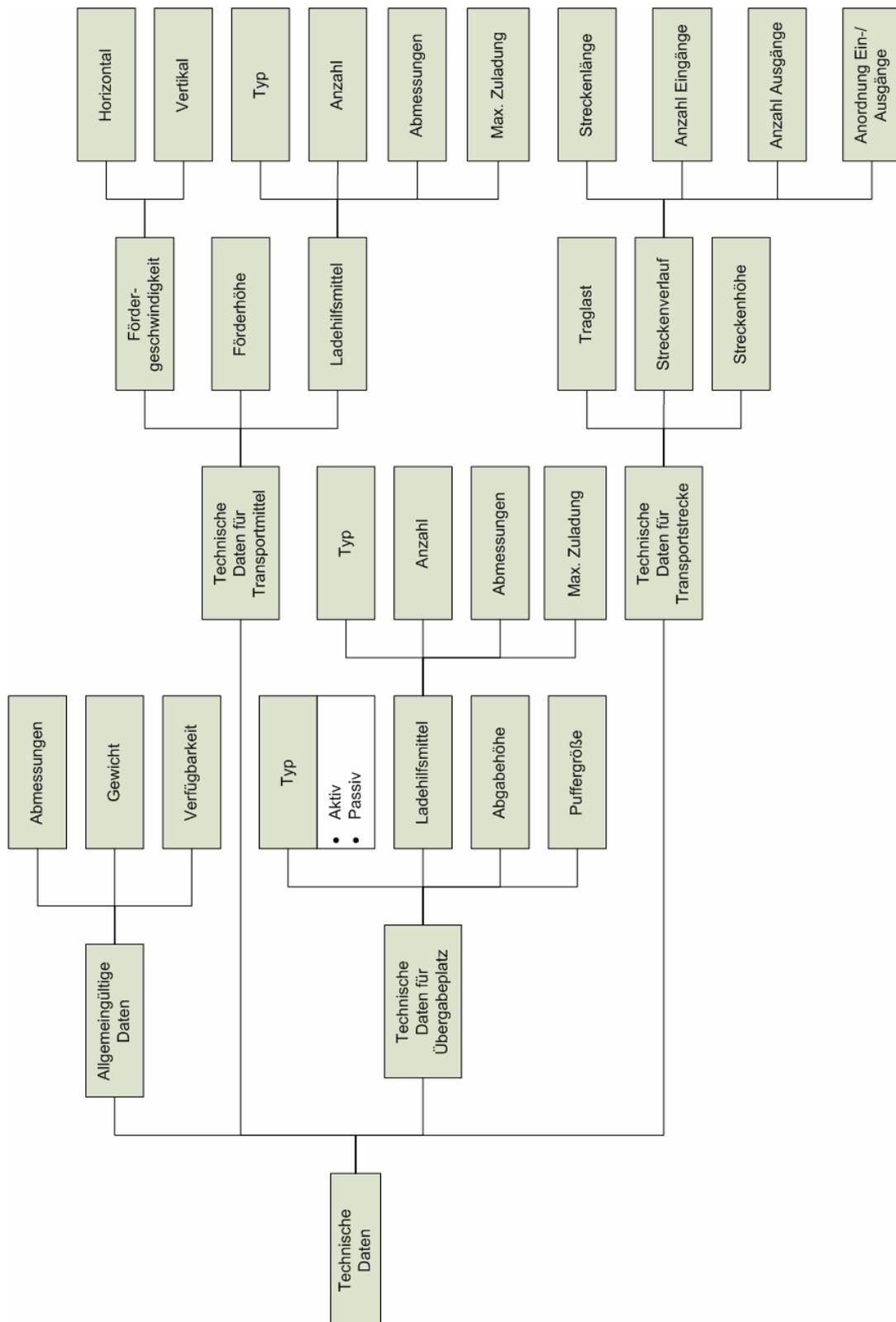


Abbildung 7-4: Datenstruktur für den Überpunkt „Technische Daten“

## Flexibilität

Bei der Beschreibung der Technikmodule hinsichtlich der beinhalteten Flexibilitätspotenziale werden die in Kapitel 5.2 erarbeiteten Kriterien für die Bewertung der Layout-, Durchsatz- und Fördergutflexibilität verwendet. Die Kriterien und die Datenstruktur der Flexibilität zeigt Abbildung 7-5.

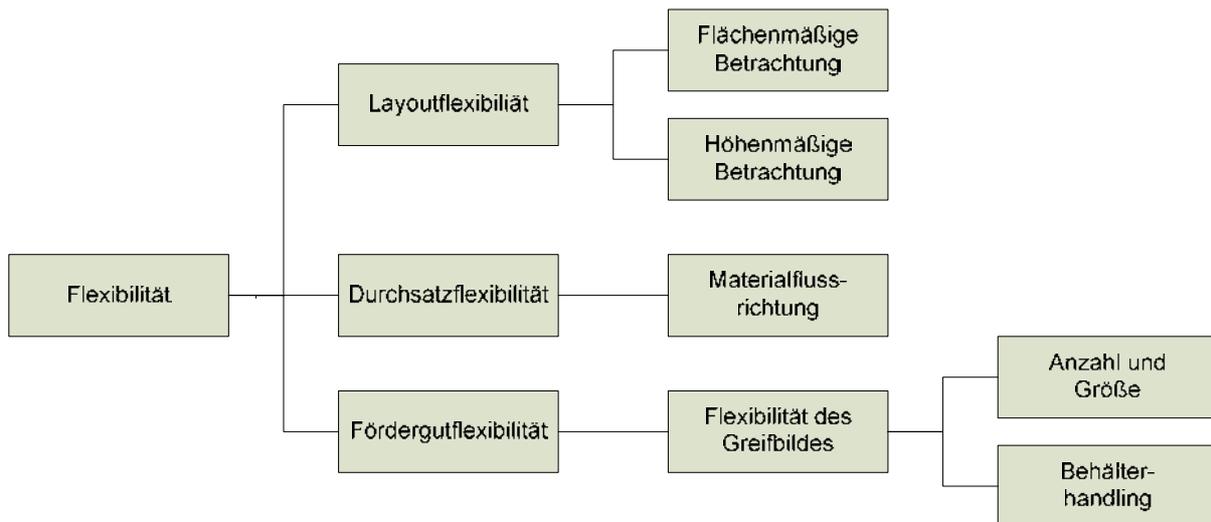


Abbildung 7-5: Datenstruktur für den Überpunkt „Flexibilität“

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 Zusammenhang zwischen den einzelnen Technikmodulen und den Flexibilitätsarten wurde in Kapitel 6.3 erarbeitet und wird in Tabelle 7-1 nochmals zusammengefasst.

Die Wandelbarkeit eines Materialflusssystemes kann nicht auf einzelne Technikmodule herunter gebrochen werden, die diese sich erst durch das Zusammenspiel der einzelnen Technikmodule ergibt.

| Flexibilitätsart<br>Technikmodule | Layout | Durchsatz | Forderungsgut |
|------------------------------------|--------|-----------|----------------|
| Transportmittel                    | ○      | ●         | ●              |
| Transportstrecke                   | ●      | ◐         | ○              |
| ubergabeplatz                     | ●      | ◐         | ●              |

- Kein Einfluss
- ◐
Indirekter Einfluss
- Direkter Einfluss

Tabelle 7-1: Zusammenhang Technikmodul und Flexibilitätsart

### Kosten

In dem überpunkt Kosten werden die Investitions-, Inbetriebnahme-, Energie-, Betriebsstoff- und Wartungskosten zusammengefasst (vgl. Abbildung 7-6). 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 Betriebsstoffkostensatze, die in der Beschreibung des Subsystems (vgl. Kapitel 7.1.2) 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.

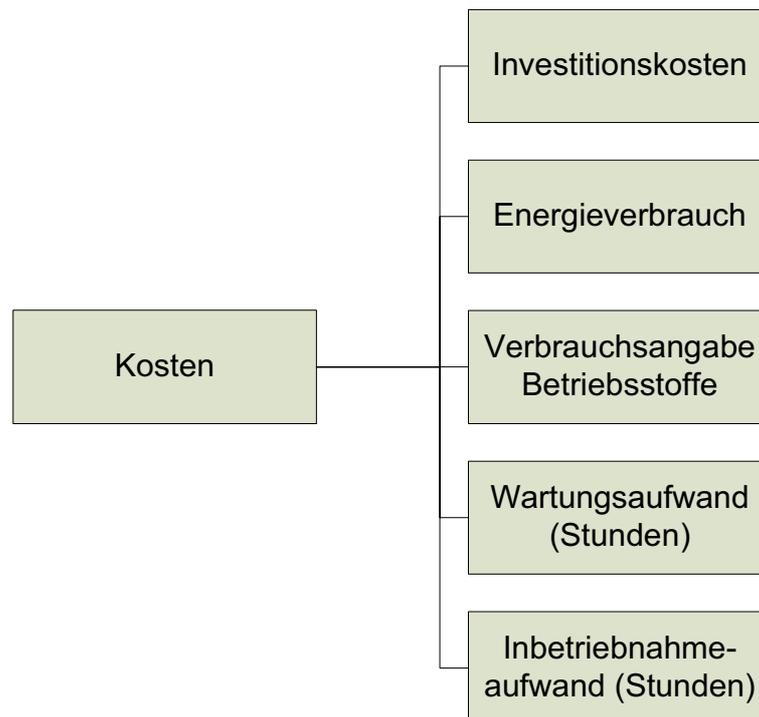


Abbildung 7-6: Datenstruktur für den Überpunkt „Kosten“

### Status

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

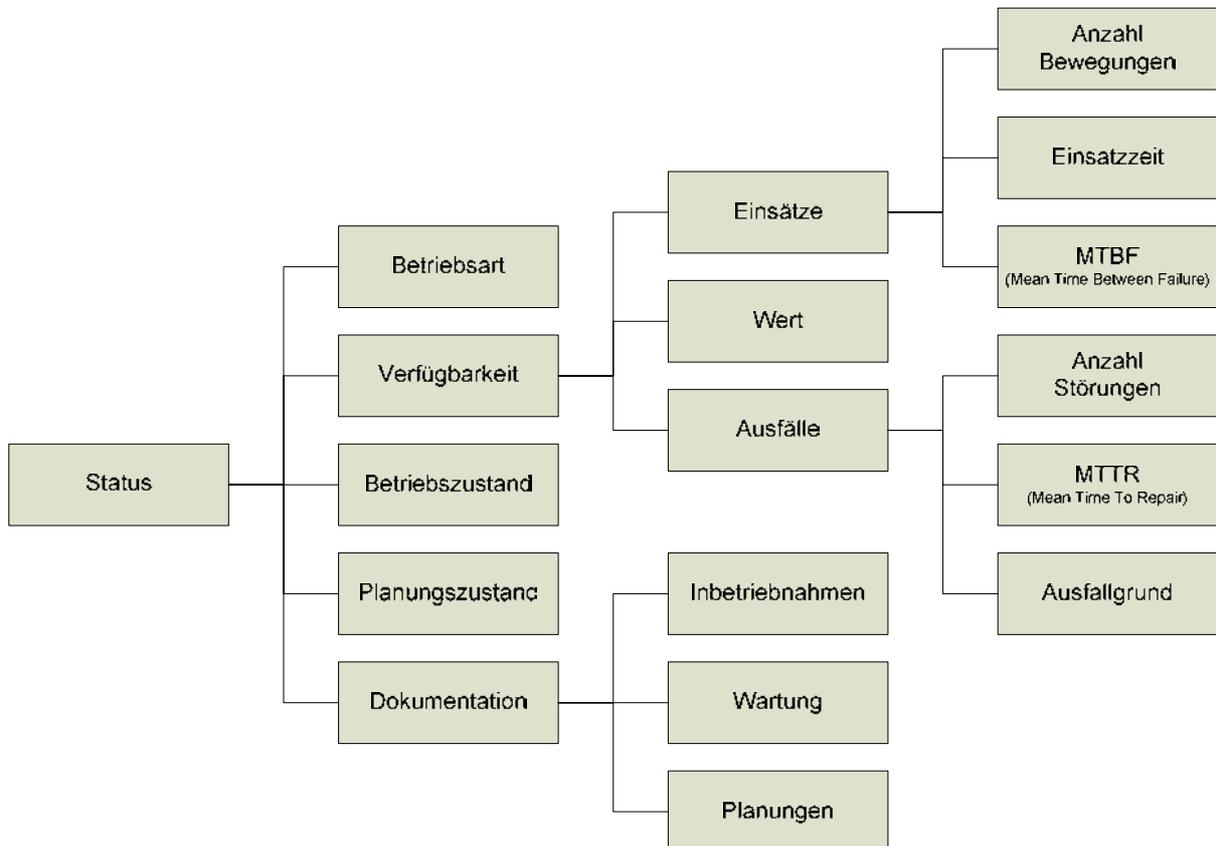


Abbildung 7-7: Datenstruktur für den Überpunkt „Status“

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

7-4). 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 7.1.2).

### **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 (vgl. Abbildung 7-8). Die Betrachtung der Modulschnittstelle war schon Hauptbestandteil einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit [Wil-06], so dass diese Beschreibung nicht weitergehend betrachtet wird und folgend nur kurz die wesentlichen Bestandteile erläutert werden.

Die mechanische Ebene der Modulschnittstelle besteht aus den allgemeinen Anschlussmaßen wie z.B. der Befestigung des Moduls am Boden bzw. an der Decke oder die konstruktive Beschreibung des Fahrwerkes eines Elektrohängebahnfahrzeuges, damit dieses auf die Schiene passt. In Bezug auf das Technikmodul „Transportstrecke“ werden in diesem Punkt auch die Anschlussmaße und –größen der einzelnen Streckenteile festgelegt. Des Weiteren werden hier die benötigten Betriebsmittel (Schmierstoffe, Werkzeuge etc.) aufgeführt.

Ferner gehört zu dem Punkt <Mechanik> das Unterelement <Fördergutschnittstelle>. Dieses Element definiert die förderguttechnische Seite der Modulschnittstelle. Diese Modulschnittstelle ist bei Transportmitteln, z.B. einem EHB-Fahrzeug, das Lastaufnahmemittel oder beschreibt die Aufnahme an einem Übergabepplatz. Sollte das Technikmodul über mehrere Fördergutschnittstellen verfügen, wird jede mit einem eigenen Element <Fördergutschnittstelle> charakterisiert. Das Element <Fördergutschnittstelle> beinhaltet die Bezeichnung des Übergabepplatzes und gibt an, ob es sich dabei um einen Moduleingang, -ausgang oder um beides handelt.

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

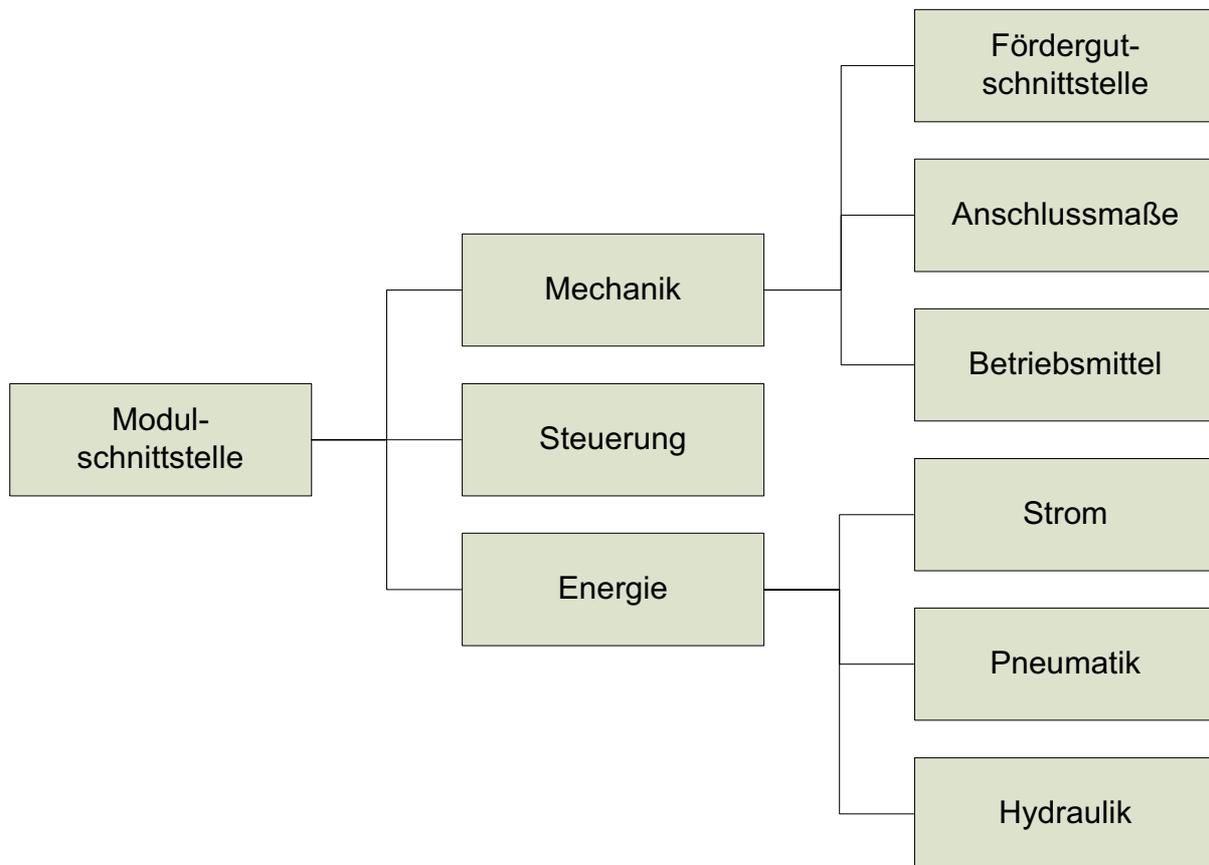


Abbildung 7-8: Datenstruktur für den Überpunkt „Modulschnittstelle“

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.

### 7.1.2 Modulbeschreibung für Subsysteme

Die Charakteristik und Eigenschaften eines Subsystems wurden in Kapitel 6.2.3.1 ausführlich beschreiben und in Tabelle 6-5 dargestellt. Subsysteme ergeben sich aus dem Zusammenspiel und der Kombination der einzelnen Technikmodule. Im Gegensatz zu Technikmodulen haben Subsysteme einen direkten Anwendungsbe-

zug und sind abhängig vom jeweiligen Einsatzort. Alle in der Beschreibung angegebenen Koordinaten stellen absolute Werte dar.

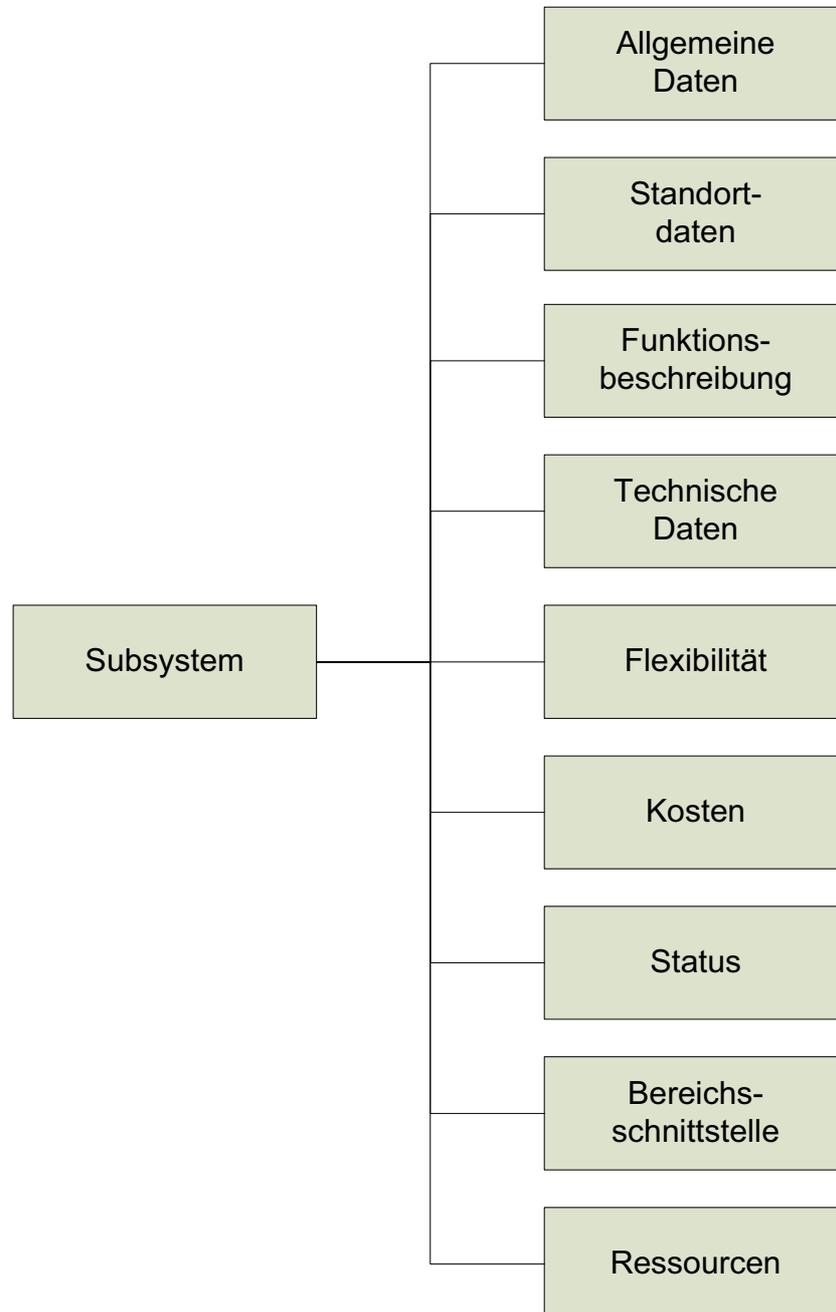


Abbildung 7-9: Datenstruktur der Beschreibung eines Subsystems

Die Struktur der Beschreibung eines Subsystems, in Abbildung 7-9 darstellt, 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 6-6) das Subsystem eingesetzt wird.

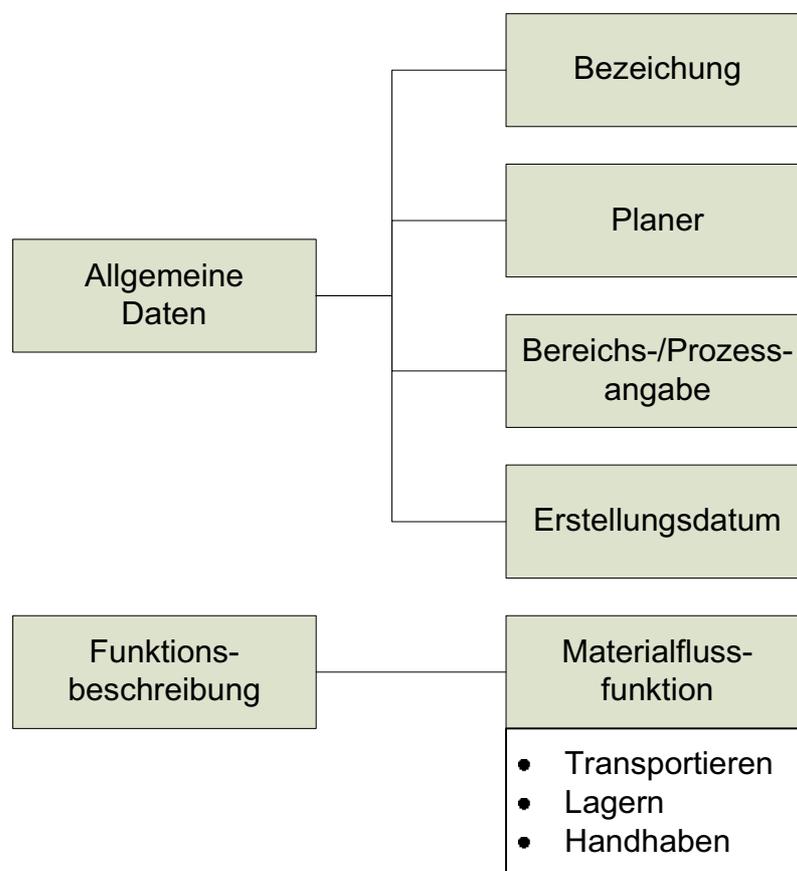


Abbildung 7-10: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Allgemeine Daten“ und „Funktion“

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.

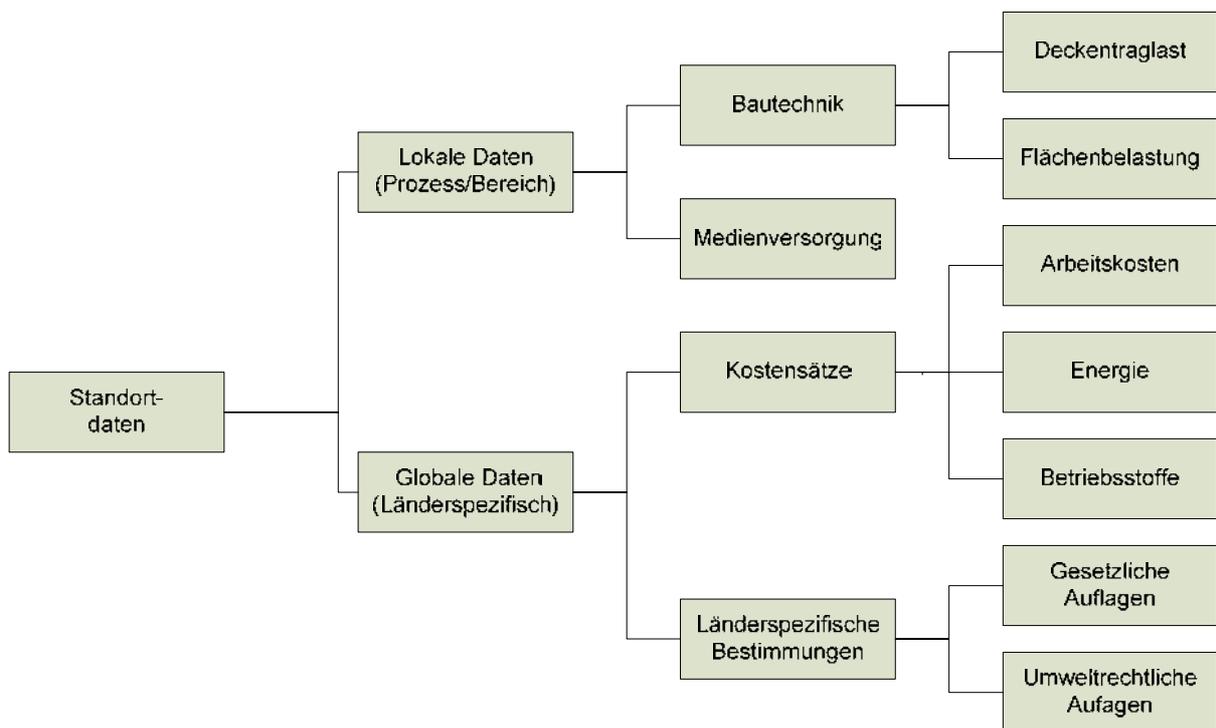


Abbildung 7-11: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Standortdaten“

### Technische Daten

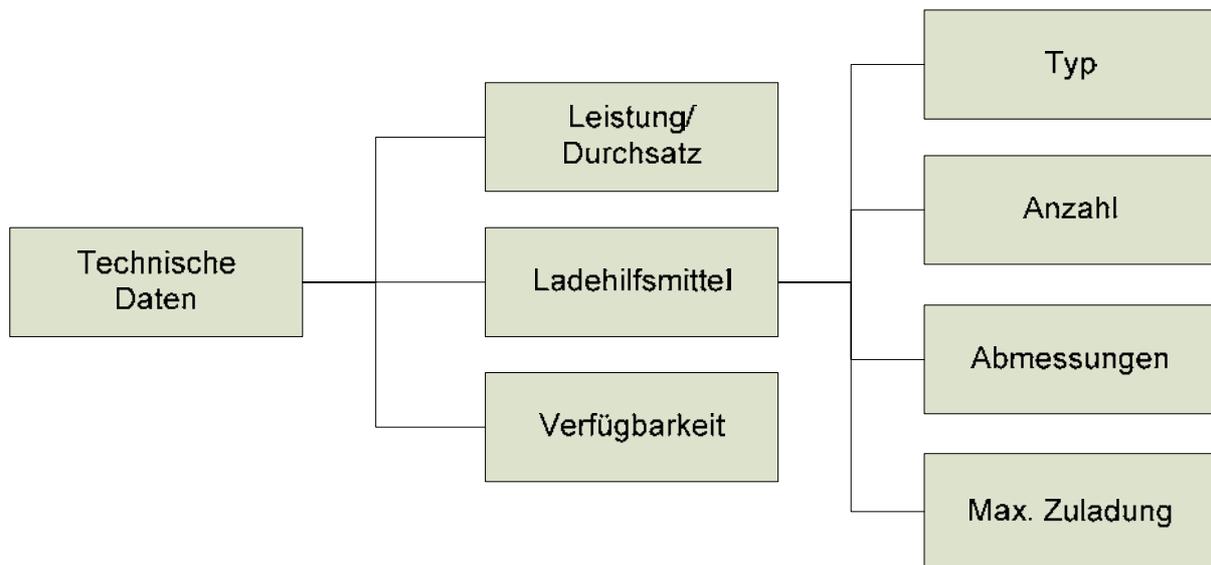


Abbildung 7-12: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Technische Daten“

Die technischen Daten beinhalten neben der Angabe der im Subsystem möglichen Leistung auch die eingesetzten Ladehilfsmittel (vgl. Abbildung 7-12). Die Bestimmung der Gesamtverfügbarkeit setzt sich aus den Einzelverfügbarkeiten der eingesetzten Technikmodule zusammen. Für die Berechnung der Gesamtverfügbarkeit stehen nach VDI 3649 je nach Art der Kombination der Technikmodule verschiedene Rechenvorschriften zur Verfügung [VDI-3649].

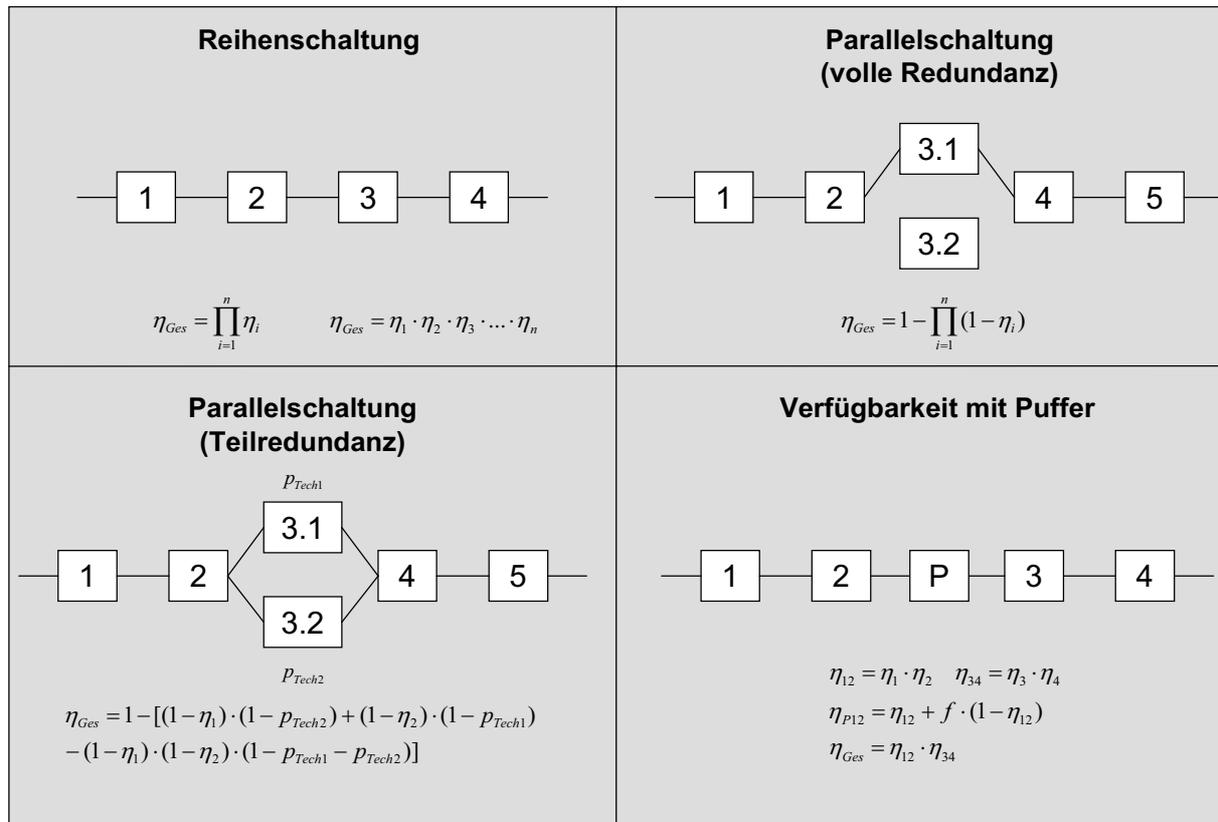


Abbildung 7-13: Berechnungsvorschriften zur Bestimmung der Gesamtverfügbarkeit

Die in Abbildung 7-13 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 Transportssystem 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 7-14 dargestellt. Bei Berechnung der Teilverfügbarkeiten der linearisierten Elemente können die Gleichungen aus Abbildung 7-13 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

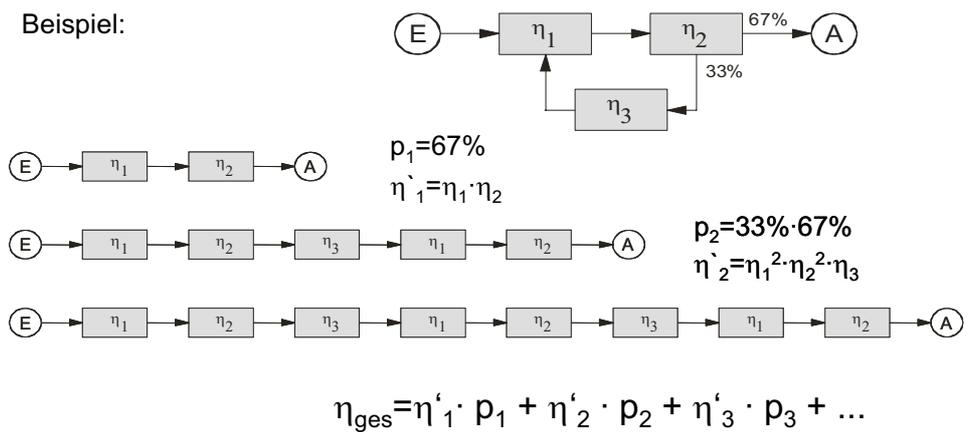


Abbildung 7-14: Vorgehensweise bei der Bestimmung der Verfügbarkeit komplexer Systeme

## 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 5.2.4 eingeführte Wandelbarkeitspotenzial des Subsystems angegeben. Die Datenstruktur der Flexibilitätsbeschreibung ist in Abbildung 7-15 dargestellt.

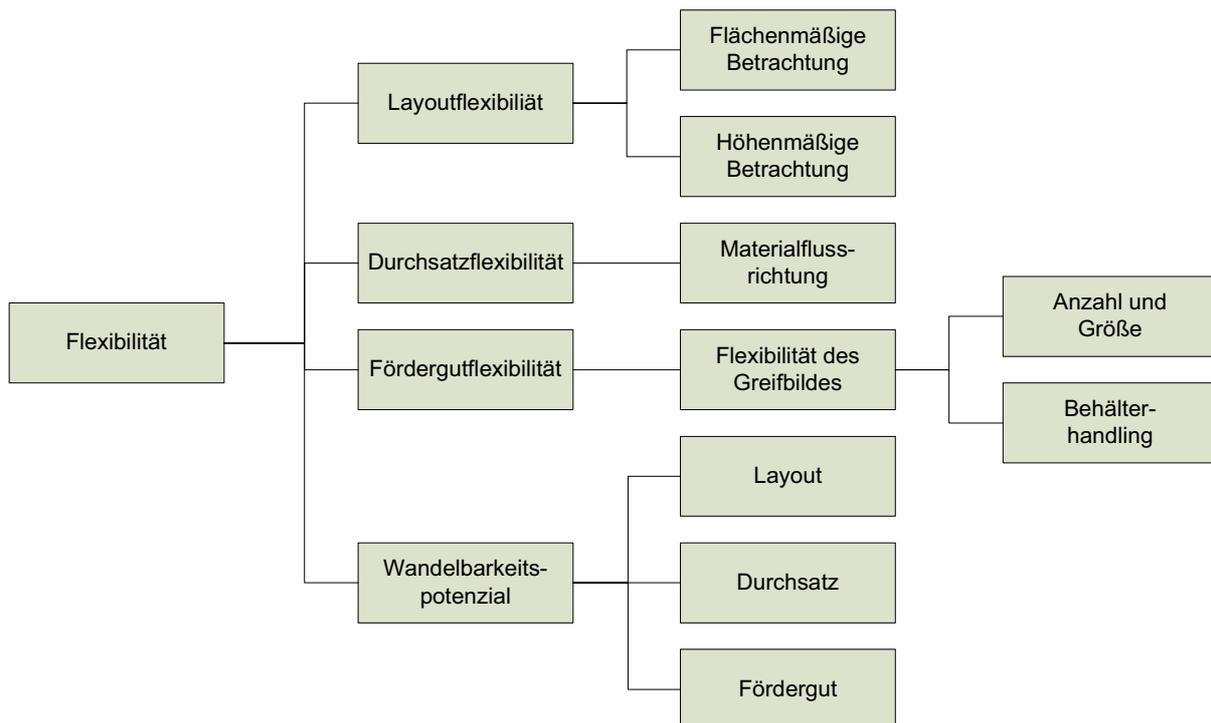


Abbildung 7-15: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Flexibilität“

## 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 7-16 dargestellt.

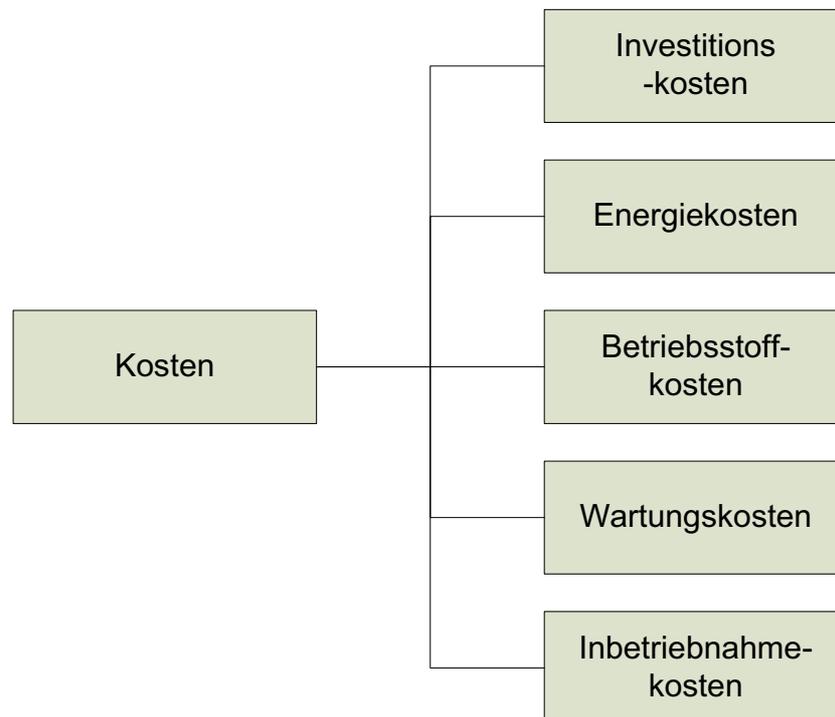


Abbildung 7-16: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Kosten“

### **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 7-17 dargestellt. Neben der Betriebsart (Initialisierung, Fehler-, Notausssituation, Bereit) werden dort Information über den jeweiligen Planungs- (Grobplanung, Feinplanung, Aufbauphase, Inbetriebnahme, Abbau-phase) 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.

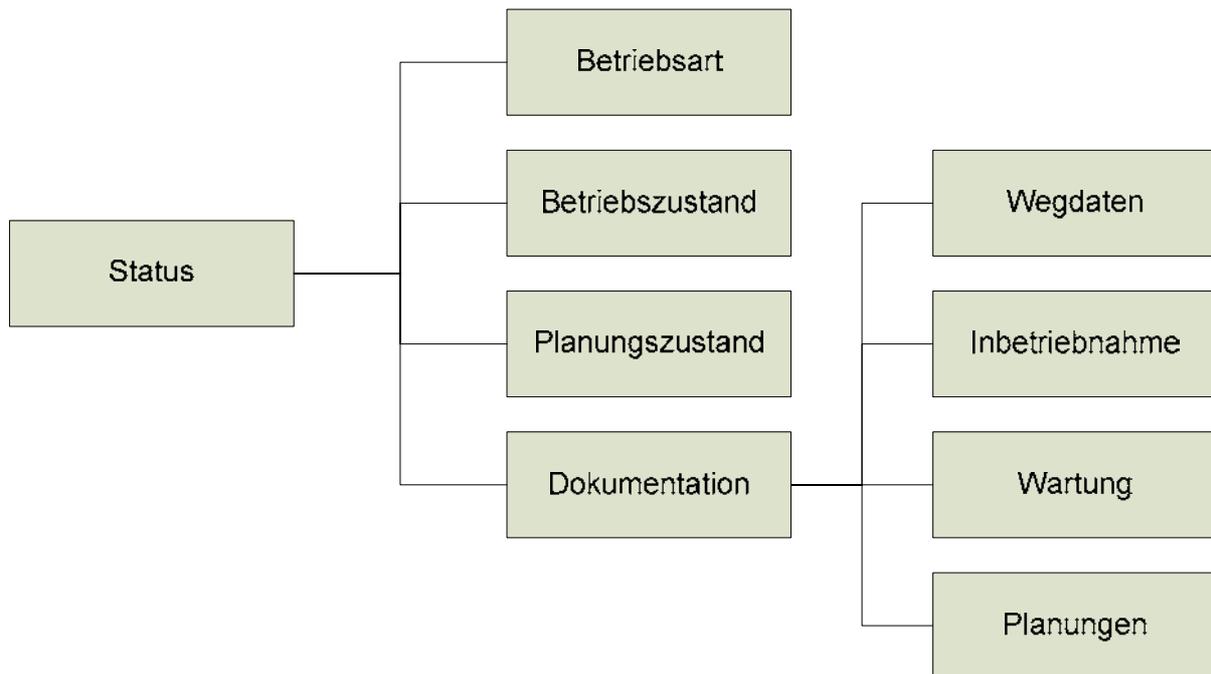


Abbildung 7-17: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Status“

### Bereichsschnittstelle

Nach dem in Kapitel 6.2 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 7-18). 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 re-

gelt den Austausch von Strom, Druckluft oder Hydrauliköl. Eine genaue Definition der beiden Schnittstellenarten soll nicht Bestandteil dieser Arbeit sein.

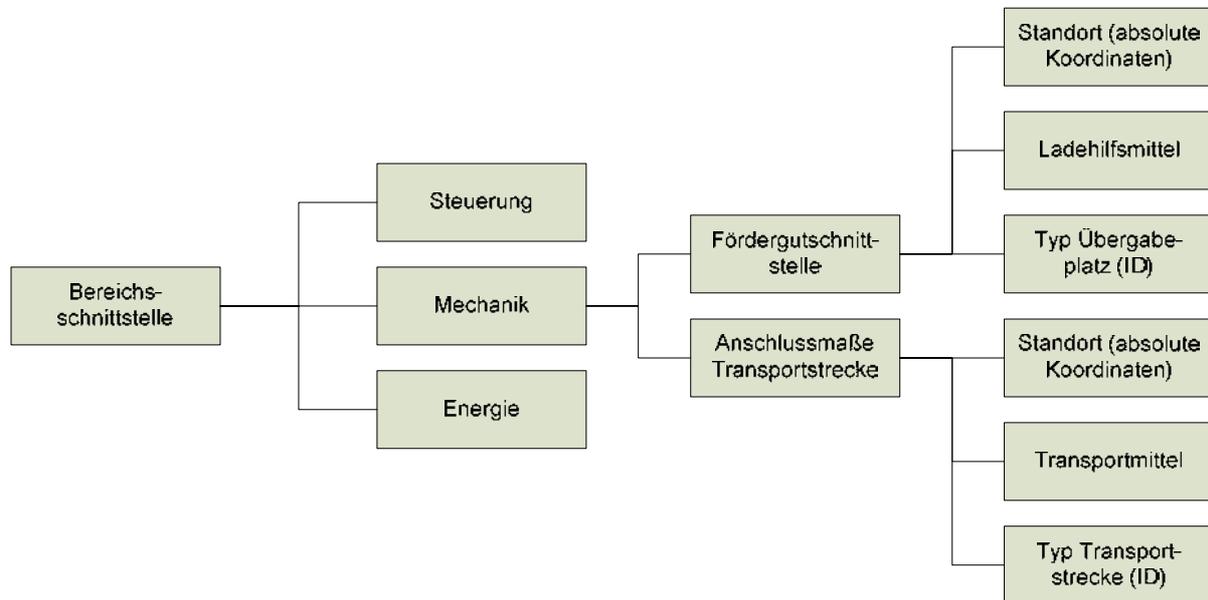


Abbildung 7-18: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Bereichsschnittstelle“

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 „Übergabepunkte“ und „Transportstrecke“ mit den entsprechenden Vorgänger- und Nachfolgermodulen kann die Steuerung alle notwendigen Informationen entnehmen, um alle möglichen Wege durch das Subsystem abzubilden.

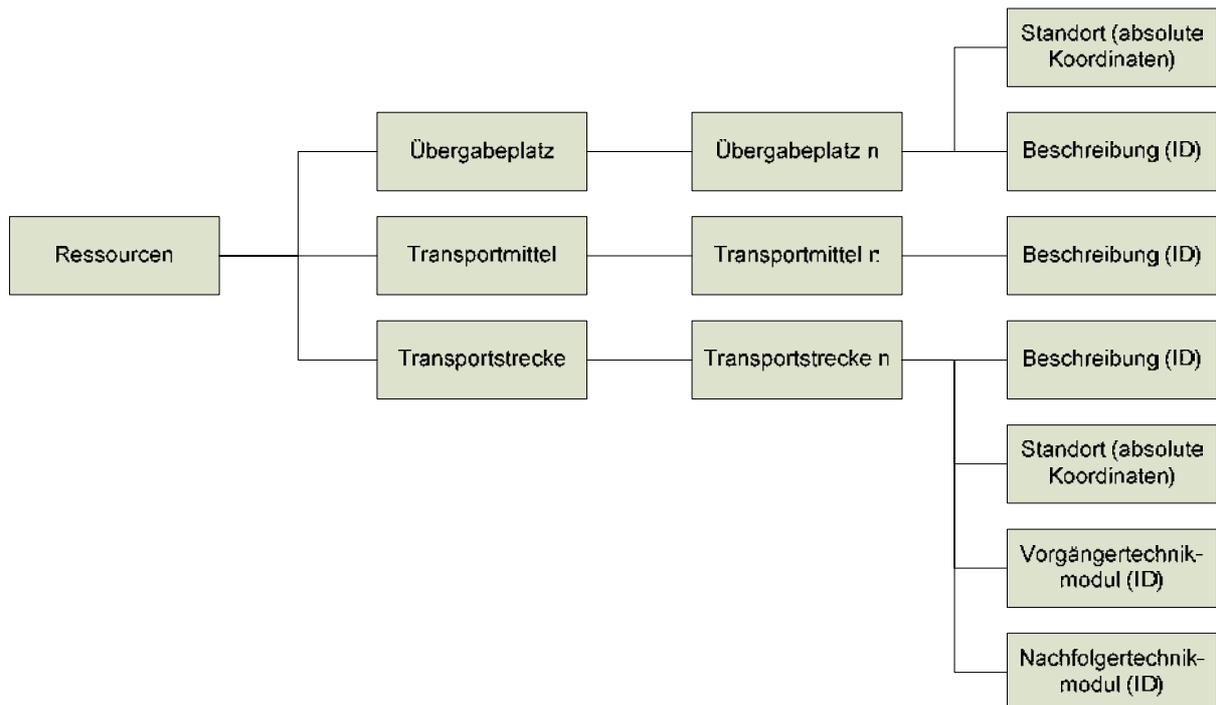


Abbildung 7-19: Datenstruktur eines Subsystems für den Überpunkt „Ressourcen“

## 7.2 Datensprache der Modulbeschreibung

Mit Hilfe der Datensprache XML (Extensible Markup Language) 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. Zum anderen bietet XML die Freiräume um jederzeit neue Informationen strukturiert hinzuzufügen. Damit wird auf der Kommunikations- und Datenebene die geforderte Erweiterungsfähigkeit gewährleistet [W3C-04].

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 Steuerung der Technikmodule aus der Modulbeschreibung die Informationen holen, wie sie mit anderen Modulen in Form von Modulanweisungen und Modulantworten miteinander kommunizieren können.

Die Datensprache XML, die aus dem IT-Bereich stammt, ermöglicht einen offenen und beliebig erweiterbaren Datenaustausch. Neben der eigentlichen Information werden gleichzeitig auch die Datenbezeichnung und das Datenformat übermittelt. Somit kann jeder Teilnehmer die Informationen auch verwerten, da die Information über das Datenformat und damit die Kodierung mitgeliefert wird. Aber auch der Mensch kann XML-kodierte Daten unter zur Hilfenahme eines Web-Browsers einfach und optisch aufgearbeitet lesen. Dadurch schafft man die Voraussetzungen, dass automatisierte Maschinen in einem wandelbaren Materialflusssystem miteinander kommunizieren können und dazu in einer Sprache, die auch der Mensch verstehen kann. Eine gemeinsame Kommunikationssprache zwischen Mensch und Maschine vereinfacht auch die Realisierung von unterschiedlichen Automatisierungsgraden innerhalb einer Anlage. Das Abbilden der Modulbeschreibungen auf Basis von XML ist Voraussetzung für die Kommunikation der Technikmodule und somit für eine durchgängige Automatisierung. Eine in der Datensprache XML ausgeführte Modulbeschreibung des Technikmoduls „Übergabepplatz“ ist in Abbildung 7-20 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 7-20: Ausführung einer Modulbeschreibung am Beispiel „Übergabeplatz“ unter Verwendung der Datensprache XML

## 7.3 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.

## 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-01] Bambynek, A.:  
Flurfreie Fördersysteme im automatisierten Materialfluss. Herbert Utz Verlag, München 2001.
- [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.
- [Bro-86] Brockhaus, F. A.:  
Brockhaus Enzyklopädie. Mannheim, 1986
- [Bul-94] Bullinger, H.-J.; Lung, M. M.:  
Planung der Materialbereitstellung in der Montage. B.G. Teubner, Stuttgart, 1994.

- [Cis-05] Cisek, R.:  
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. . Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 2005 (iwb Forschungsberichte 191).
- [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.
- [Doh-01] Dohms, R.:  
Methodik zur Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger, dezentraler Produktionsstrukturen. Shaker Verlag, Aachen, 2001.
- [Dom-96] Dombrowski, U.  
Einführung eines standardisierten Multisite-PPS-Systems in Client-Server-Architektur AWF-PPS-Erfahrungsforum, Moderne PPS und Vitale Fabrik, 21./22.02.1996, Maritim Hotel Gelsenkirchen
- [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 varian-  
tenreichen Serienproduktion. Herbert Utz Verlag Wissenschaft,  
München 2001 (iwv Forschungsberichte 152).
- [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-01a] 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.
- [Eve-01b] Eversheim, W.; Sesterhenn, M.; Harre, J.:  
LicoPro – Lifecycle-oriented design of flexible and agile production.  
Proceedings of the international IMS project forum. Ascona: 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.
- [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-02] Günthner, W. A.; Heinecker, M.; Wilke, M.:  
Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen. In: Industrie  
Management 18 (2002) 5, GITO mbH Verlag für Industrielle Informati-  
onstechnik und Organisation, Berlin, 2002.

- [Gün-03a] Günthner, W. A.; Wilke, M.:  
Mass Customization requires changeable material flow systems. Interdisciplinary World Congress on Mass Customization and 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 Supraadaptive 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 Fördertechnik 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 Wissenschaft, München, 1999.
- [Han-74] Hansen, F.:  
Konstruktionswissenschaft. Carl Hanser Verlag. München, 1974

- [Han-01] Handrich, W.:  
Flexible, flurfreie Materialflusstechnik für dynamische Produktionsstrukturen. 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.): Lagerplanung, -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.
- [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 Materialflusssteuerung für  
Stückguttransport. Dissertation, Magdeburg, 2003.
- [Mar-98] Martin, H.:  
Transport- und Lagerlogistik: Planung, Aufbau und Steuerung von  
Transport- und Lagersystemen. Vieweg, Braunschweig Wiesbaden,  
1998.
- [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 strategic implications of flexibility in manufacturing systems. Intern-  
tional 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 organisa-  
torisch wandlungsfähig. In: 5. Deutsche Fachkonferenz Fabrik-  
planung, Tagungsband, 31. März – 1. April 2004, Stuttgart.
- [Nyh-04b] Nyhuis, P.; Heger, C. L.:  
Adequate Factory Transformability at Low Costs. COMA 04 - Interna-  
tional Conference on Competitive Manufacturing, 2004
- [Ost-93] Ost, S.:  
Entwicklung eines Verfahrens zur differenzierten Flexibilitätsanalyse  
und –bewertung. TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Werkzeugma-  
schinen und Automatisierungstechnik an der TUHH, 1993.
- [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 Infor-  
mationszeitalter. 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 iw/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 iw Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München, 2005.
- [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.
- [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-03c] Schuh, G.; Sesterhenn, M.; König, R.:  
Lifecycle design of collaborative production systems. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF), Hanser Verlag; March 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.

- [Tem-93] Tempelmeier, H.: Flexible Fertigungssysteme: Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1993.
- [Teu-04] Teumer, H.:  
Wirtschaftliche Produktion am Standort Deutschland durch wandlungsfähige Organisationsformen. In: 5. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, Tagungsband, 31. März – 1. April 2004, Stuttgart.
- [Tse-03] Tseng, M. M.; Piller, F. T.:  
The Customer Centric Enterprise. Springer, Berlin, 2003.
- [Ued-97] Ueda, K.; Vaario, J.:  
The Biological Manufacturing System. University Kobe, Japan, 1997
- [UIC 435-2] Internationaler Eisenbahnverband (UIC):  
Gütenorm für eine europäische Vierweg-Flachpalette aus Holz mit den Abmessungen 800 mm \* 1200 mm. Paris, 2005.
- [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.
- [vBr-00] Van Brussel, H., Valckenaers, P.:  
Holonc 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-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-98a] 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-98b] Westkämper, E.:  
Die virtuelle Fabrik. In: Tagungsband 2. Deutsche Fachkonferenz für Fabrikplanung (Fabrik 2000+), Verlag Moderne Industrie, Frankfurt am Main, 1998
- [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-00] Wiendahl, H.-P.; Hernandez, R.:  
Wandlungsfähigkeit - neues Zielfeld in der Fabrikplanung. Industrie Management, Jg. 16, Heft 5, GITO-Verlag, S. 37-41, 2000.
- [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-98a] Wildemann, H.:  
Die modulare Fabrik – Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. TCW-Verlag, München, 1998.
- [Wil-98b] Wildemann, H.:  
Der Weg zum agilen Unternehmen: Kostenführerschaft und Service. In: Das agile Unternehmen, Hrsg. H. Wildemann, München, 1998
- [Wil-06] Wilke, M.:  
Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 2006.
- [Wir-01] Wirth, S.:  
Die wandlungsfähige Fabrik, Jahrbuch der Logistik 2000, Verl.-Gruppe Handelsblatt, Düsseldorf, 2001,

- [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-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. Utz-Verlag, München, 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).