

# **MASTERARBEIT**

## **Entwicklung eines Konzepts zur Nutzung von Traceability für die Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen mit Hilfe von ereignisdiskreter Simulation**

bearbeitet von: Johanna Christine Kopp

Studiengang: Maschinenbau

Matrikel-Nr.: 126827

Ausgegeben am: 22.05.2015

Eingereicht am: 06.11.2015

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

Betreuer: Dipl.-Geoinf. Maik Deininger

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>4</b>
2.1 Grundlagen zu Produktions- und Logistikprozessen .....	4
2.1.1 Produktion und Produktionslogistik .....	4
2.1.2 Klassifizierung von Produktions- und Logistikprozessen.....	6
2.1.3 Digitale Fabrik und Industrie 4.0.....	8
2.2 Traceability in innerbetrieblichen Produktions- und Logistikprozessen.....	9
2.2.1 Definition und Klassifizierung .....	9
2.2.2 Anwendungsgebiete und Potentiale der Traceability .....	11
2.2.3 Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Traceabilitysystems .....	14
2.2.4 Trace-Objekte .....	19
2.2.5 Identifikationstechnik .....	21
2.2.6 Datenverarbeitung im Rahmen der Traceability .....	26
2.3 Ereignisdiskrete Simulation im Produktionsbetrieb.....	31
2.3.1 Klassifizierung und Anwendungsfelder .....	31
2.3.2 Komponenten einer ereignisdiskreten Simulation.....	34
2.3.3 Vorgehensweise bei der Simulation .....	37
2.3.4 Simulationswerkzeuge.....	43
<b>3 Anforderungsdefinition .....</b>	<b>45</b>
3.1 Abgrenzung des betrachteten Systems .....	45
3.2 Anforderungen an das Traceabilitysystem .....	46
3.3 Anforderung an das Simulationskonzept .....	48
<b>4 Entwicklung des Traceabilitysystems .....</b>	<b>49</b>
4.1 Definition der identifizierbaren Objekte .....	49
4.1.1 Definition der rückverfolgbaren Objekte .....	49
4.1.2 Kategorisierung der Objekte in der Fabrik.....	51
4.2 Charakterisierung notwendiger Prozesse .....	53
4.3 Herleitung der benötigten Parameter.....	55

---

4.3.1	Identifizierung der benötigten Datensätze der Trace-Objekte.....	55
4.3.2	Datensätze der einzelnen Prozessbausteine.....	58
4.4	Auswahl einer geeigneten Identifizierungstechnik .....	62
<b>5</b>	<b>Entwicklung des Simulationsmodells.....</b>	<b>65</b>
5.1	Verifikation und Validierung der Aufgabendefinition.....	66
5.2	Systemanalyse .....	67
5.2.1	Definition der Modellelemente.....	67
5.2.2	Beschreibung der Ablauf- und Aufbaustruktur .....	69
5.2.3	Schnittstelle zur realen Produktion und dem Traceabilitysystem .....	74
5.2.4	Verifikation und Validierung des Konzeptmodells.....	76
5.3	Definition der notwendigen Daten .....	77
5.3.1	Systemdaten des Konzepts .....	77
5.3.2	Eingangsdaten.....	79
5.3.3	Experimentdaten.....	81
5.3.4	Ergebnisdaten .....	82
5.4	Modellformalisierung und Implementierung .....	84
5.4.1	Definition der Objekte und deren Verhalten .....	84
5.4.2	Verknüpfung der Steuerung durch die Methoden .....	88
5.4.3	Verifikation und Validierung des ausführbaren Modells .....	93
<b>6</b>	<b>Umsetzung des Konzepts.....</b>	<b>95</b>
6.1	Vorstellung des exemplarischen Produktionsbereichs.....	95
6.1.1	Auswahl und Vereinfachung des Produktionsbereichs .....	95
6.1.2	Datenaufnahme und -aufbereitung .....	97
6.2	Erstellung des Simulationsmodells .....	99
6.2.1	Modellierung der Prozesse .....	99
6.2.2	Anpassung und Vereinfachungen des Ablaufverhaltens.....	102
6.3	Durchführung und Auswertung von Experimenten .....	103
6.4	Bewertung des Simulationsmodells .....	107
6.5	Fazit des Konzepts .....	108
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>110</b>
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>111</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>

## Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
Auto-ID	automatische Identifikation
BDE	Betriebsdatenerfassung
bzw.	beziehungsweise
CAD	computerunterstütztes Konstruieren (engl. computer-aided design)
CAM	computerunterstützte Fertigung (engl. computer-aided manufacturing)
CAO	computerunterstützte Verwaltung (engl. computer-aided office)
CAP	computerunterstützte Planung (engl. computer-aided planning)
CAQ	computerunterstützte Qualitätssicherung und -kontrolle (engl. computer-aided quality assurance)
DES	ereignisdiskrete Simulation (engl. discrete event Simulation)
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DV	Datenverarbeitung
EAN	Europäische Artikelnummer (engl. European article number)
EPC	Elektronischer Produktcode
ERP	unternehmerische Ressourcenplanung (engl. Enterprise-Resource-Planning)
FEM	Finite-Elemente-Methode
FIFO	der Reihe nach (engl. first in- first out)
ID	Identifikator
ILN	Internationale Lokationsnummer
IT	Informationstechnik
MES	Fertigungsmanagementsystem (engl. Manufacturing execution system)
MKS	Mehrkörpersimulation
MTBF	mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (engl. Mean Time Between Failures)
MTTR	mittlere Reparaturzeit (engl. Mean Time To Repair)

---

NC	Numerische Steuerung (engl. Numeric Control)
Nr.	Nummer
NVE	Nummer der Versandeinheit (engl. SSCC: Serial Shipping Container Code)
OCR	optische Zeichenerkennung (engl. Optical Character Recognition)
PPR	Produkt-Prozess-Ressourcen
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
QR-Code	Markenname für zweidimensionalen Code (engl. Quick-Response-Code)
RFID	Radiofrequenz-Identifikation (engl. radio frequency identification)
V&V	Verifikation und Validierung
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
VV&T	Verifikation, Validierung und Tests

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Produktionsprozess.....	5
Abbildung 2-2 Einordnung der Produktionslogistik.....	6
Abbildung 2-3 Techniken der Digitalen Fabrik.....	8
Abbildung 2-4 Tracking und Tracing.....	9
Abbildung 2-5 Maximen des Qualitätsmanagements.....	12
Abbildung 2-6 Dimensionen von Traceabilitysystemen.....	15
Abbildung 2-7 Allgemeines Vorgehensmodell der Traceability.....	17
Abbildung 2-8 Typische Identifizierungstechniken.....	22
Abbildung 2-9 Verknüpfung des Warenstroms mit dem Informationsfluss.....	27
Abbildung 2-10 Beziehung unterschiedlicher Trace-Objekte.....	28
Abbildung 2-11 Einordnung des MES in die Leitebenen eines Unternehmens.....	29
Abbildung 2-12 Vorgehen bei der Simulation.....	31
Abbildung 2-13 Planungsfelder am Beispiel der Simulation der Versorgungsprozesse einer Montagelinie.....	34
Abbildung 2-14 Simulationsdaten.....	36
Abbildung 2-15 Simulationsvorgehensmodell.....	37
Abbildung 2-16 Simulationswerkzeuge.....	43
Abbildung 4-1 Betrachtete Trace-Objekte.....	50
Abbildung 5-1 Übersicht der Elemente und Bausteine des Simulationsmodells.....	68
Abbildung 5-2 Schematische Ablaufstruktur.....	70
Abbildung 5-3 Schematische Darstellung der Lagerung.....	71
Abbildung 5-4 Schematische Darstellung der Montage.....	72
Abbildung 5-5 Schematische Darstellung des Transports.....	73
Abbildung 5-6 Schematische Darstellung der Kommissionierung.....	73
Abbildung 5-7 Erstellung des Initialzustands der Simulation.....	75
Abbildung 5-8 Exemplarisches Auslastungsdiagramm.....	83
Abbildung 5-9 Darstellung der beweglichen Elemente.....	84
Abbildung 5-10 Verbindung von Quelle, Lagerplatz und Senke.....	85
Abbildung 5-11 Darstellung des Transports.....	86
Abbildung 5-12 Darstellung der Bearbeitungsstation.....	86
Abbildung 5-13 Darstellung der Montage und der Kommissionierung.....	87
Abbildung 5-14 Kommissionierung.....	87
Abbildung 6-1 Schematischer Materialfluss.....	96
Abbildung 6-2 Grundlegender Aufbau des Simulationsmodells.....	99
Abbildung 6-3 Darstellung der Vorprozesse in Plant Simulation.....	100
Abbildung 6-4 Darstellung von Supermarkt, Kommissionierung und Endmontage....	101

---

Abbildung 6-5 Auslastungsdiagramm der Arbeitsstationen in Versuch 1 .....	104
Abbildung 6-6 Leeranteil der Lagerplätze der Vorprozesse in Versuch 1 .....	105
Abbildung 6-7 Leeranteil der Lagerplätze im Supermarkt in Versuch 1 .....	105
Abbildung 6-8 Auslastung der Mitarbeiter in Versuch 1 .....	105
Abbildung 6-9 Verlauf der Durchlaufzeiten über die durchgeführten Versuche .....	106
Abbildung 6-10 Leeranteil der Lagerplätze im Supermarkt in Versuch 5 .....	106
Abbildung 8-1 Gesamtansicht des Simulationsmodell .....	119

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Merkmalsstrukturen der Auftragsauslösungsart.....	7
Tabelle 2-2 Vorgehen bei der Entwicklung eines Traceabilitymodells.....	18
Tabelle 2-3 Vor- und Nachteile von Barcodes .....	24
Tabelle 2-4 Vor- und Nachteile von RFID .....	26
Tabelle 2-5 Simulationsdaten .....	39
Tabelle 2-6 Verwendbarkeit von V&V-Techniken im Verlauf der Simulationsstudie ..	42
Tabelle 4-1 Definierte Prozessbausteine zur Beschreibung der Produktion.....	55
Tabelle 4-2 Allgemeiner Datensatz für ein Trace-Objekt .....	57
Tabelle 4-3 Allgemeiner Datensatz für einen Ladungsträger .....	58
Tabelle 4-4 Datensatz des Prozessbausteins Bearbeitung .....	59
Tabelle 4-5 Datensatz des Prozessbausteins Montage.....	60
Tabelle 4-6 Datensatz des Prozessbausteins Lagerung.....	60
Tabelle 4-7 Datensatz des Prozessbausteins Transport .....	61
Tabelle 4-8 Datensatz des Prozessbausteins Kommissionierung .....	61
Tabelle 4-9 Datensatz des Prozessbausteins Vereinzelung .....	62
Tabelle 5-1 Ergebnisse des strukturierten Durchgehens der Anforderungen und Zielvorstellungen .....	66
Tabelle 5-2 Verifikation und Validierung des Konzeptmodells.....	76
Tabelle 5-3 Notwendige Daten und Datentypen zum Lagerort .....	77
Tabelle 5-4 Notwendige Daten und Datentypen des Arbeitsplans .....	78
Tabelle 5-5 Notwendige Daten und Datentypen der Stückliste.....	78
Tabelle 5-6 Erzeugungstabelle für die Transportmitarbeiter .....	79
Tabelle 5-7 Aufbau des Schichtplans .....	79
Tabelle 5-8 Attribute der beweglichen Elemente .....	80
Tabelle 5-9 Notwendige Daten für die Auftragsreihenfolge .....	81
Tabelle 5-10 Vorlage für die Liefervorschau .....	81
Tabelle 5-11 Experimentliste für die Mitarbeiteranzahl an den Arbeitsstationen .....	82
Tabelle 5-12 Experimentliste für die Lagerplatzkapazität.....	82
Tabelle 5-13 Inhalt der Endtabelle mit allen gefertigten Komponenten .....	82
Tabelle 5-14 Struktogramm der Init-Methode.....	89
Tabelle 5-15 Struktogramm der Methode <u>Historie Eingang</u> .....	89
Tabelle 5-16 Struktogramm der Methode <u>Historie Ausgang</u> .....	90
Tabelle 5-17 Struktogramm der Methode <u>Bearbeitungszeitformel</u> .....	91
Tabelle 5-18 Struktogramm der Steuerung der Montagestation.....	92
Tabelle 5-19 Struktogramm der Methode <u>Endtabelleerzeugen</u> .....	93
Tabelle 5-20 Strukturiertes Durchgehen des ausführbaren Modells .....	94
Tabelle 6-1 Eingabedaten des ersten Versuchs.....	104

---

Tabelle 8-1 Merkmale der Ablauforganisation und Einsatzpotenzial der Ablaufsimulation .....	111
Tabelle 8-2 V&V Techniken .....	111
Tabelle 8-3 Verwendete Datentypen und Wertebereiche in Plant Simulation .....	113
Tabelle 8-4 Sinnbilder für Struktogramme .....	113
Tabelle 8-5 Verwendete Auftragsreihenfolge.....	116
Tabelle 8-6 Namen der Lagerplätze und deren Lage im Modell .....	117

# 1 Einleitung

Eine essentielle Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit von mitteleuropäischen Industrieunternehmen spielt die schnelle sowie permanente Anpassung der Produktionslogistik an sich ändernde Bedingungen, damit das komplexe System Fabrik stets in einem optimalen Arbeitspunkt gehalten werden kann (März und Weigert 2011, S. 3). Um einen solchen Arbeitspunkt zu erreichen sind effiziente Logistik- und Produktionsprozesse notwendig, die die vier entscheidenden Wettbewerbsfaktoren Kosten, Qualität, Zeit und Flexibilität (Bolstorff et al. 2007, S. 125) erfüllen. So ist die erstklassige Qualität von Produkten heutzutage für den Kunden eine Selbstverständlichkeit (Kletti 2006, S. 9) und kurze Lieferzeiten und die Termineinhaltung besitzen dieselbe Wichtigkeit wie der technologische Stand der Produkte (März und Weigert 2011, S. 3 f.). Um diese Ziele flexibel und bei niedrigen Kosten zu erreichen, müssen die Produktions- und Logistikprozesse aufeinander abgestimmt und optimiert werden. Dazu zählt beispielsweise unnötige Bestände, Warenflüsse und Verzögerungszeiten zu identifizieren und zu eliminieren.

Eine Möglichkeit, diese Ziele zu erreichen, bietet der verstärkte Einsatz von Traceability, also der Rückverfolgung und Verfolgung von Losen, Chargen oder Produkten (Kletti 2006, S. 171), innerhalb der Produktion. Als strategischer Unternehmensfaktor ermöglicht sie wirtschaftliche Vorteile innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette (Kletti 2006, S. 191 f.). Durch eine Rückverfolgung und Verfolgung der Objekte in der Fabrik werden die realen Zustände transparent, sodass die Prozesse analysiert und optimiert werden können. Außerdem können unbekannte Zusammenhänge zwischen Produktionsparametern und Produkteigenschaften durch die Analyse der aufgenommenen Daten aufgedeckt werden (Weckenmann et al. 2014, S. 843), sodass eine Qualitätsverbesserung erfolgen kann.

Trotz der vielfältigen Verbesserungen, die durch den Einsatz von Traceability erzielt werden können, bleibt eine Fabrik ein komplexes System, das geprägt ist durch viele verschiedene Einflussgrößen und Veränderungen, deren Konsequenzen nicht einfach prognostiziert werden können. Um dennoch Aussagen treffen zu können eignet sich die Simulation, mit der komplexe Systeme hinsichtlich des Ablaufverhaltens untersucht und beurteilt werden können (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1). Durch Experimente an einem Simulationsmodell wird so versucht ein Optimum der Parameter zu finden.

Sowohl die Simulation als auch der Einsatz von Traceability tragen unabhängig voneinander zur Optimierung der Prozesse innerhalb der Fabrik bei, doch sie müssen so miteinander verknüpft werden, dass ihre Potentiale voll ausgenutzt werden können (VDI 5600 Blatt 5). Das Ziel dieser Arbeit ist daher der Entwurf eines Traceability-Konzepts, dass die Steuerung der Produktions- und Logistikprozesse verbessert und in der Lage

ist, weitere Vorteile in den angrenzenden Funktionsbereichen in Form von Qualitäts-, Zeit- und Kostenaspekten zu erzielen.

Dieses Konzept soll den Entwurf einer ereignisdiskreten Simulation (DES) beinhalten, die den zeitlichen Verbrauch der Ressourcen in der Produktion für die einzelnen Bereiche prognostiziert. Das Konzept beschreibt, wie die Objekte in der Fabrik vom Wareneingang bis zum Warenausgang durch die Fabrik verfolgt werden können und dabei die entsprechenden Daten erfasst werden. Aufbauend auf den so entstandenen Daten wird eine ereignisdiskrete Simulation erstellt, die prognostiziert, wann sich welches Objekt wo in der Fabrik befinden wird. Zur Optimierung der Prozesse können Experimente an diesem Simulationsmodell durchgeführt werden.

Um das beschriebene Konzept zu erstellen, wird wie folgt vorgegangen. Nachdem im ersten Kapitel die Motivation, die Zielsetzung und das Vorgehen dieser Arbeit erörtert wurden, werden im zweiten Kapitel die für die Entwicklung des Konzepts benötigten Grundlagen erarbeitet. So wird nicht nur die Nützlichkeit der Kombination der beiden Bereiche, sondern auch die aktuelle Relevanz des Themas ausgeführt. Dazu werden zunächst die Grundbegriffe im Bereich Produktion und Logistik aufgearbeitet, um ein eindeutiges Verständnis für das folgende Konzept zu gewährleisten.

Dann werden die notwendigen Grundlagen der Traceability dargestellt, wozu die Potentiale und Anwendungsbereiche, die die Traceability bietet, betrachtet werden. Anschließend wird das Vorgehen bei der Entwicklung eines solchen Systems erläutert. Dazu gehört neben der genaueren Betrachtung der rückverfolgbaren Objekte und möglicher Identifikationsverfahren auch die Art der Datenverarbeitung. Die detaillierte Betrachtung dieser Aspekte stellt sicher, dass die Leistungsfähigkeit der Traceability in der Erstellung des Konzepts optimal ausgeschöpft wird.

Im darauf folgenden Abschnitt wird die ereignisdiskrete Simulation im Hinblick auf das entstehende Simulationsmodell näher betrachtet. Zunächst wird sie mit Hilfe von weiteren Simulationsarten sowie deren Einsatzgebieten charakterisiert und ein Einblick in deren Potentiale gegeben. Als Grundlage für die Entwicklung des Simulationsmodells wird das allgemeine Vorgehen erläutert und die notwendigen Komponenten eines Simulationsmodells vorgestellt. Im Anschluss folgt ein Einblick in die verschiedenen Arten von Simulationswerkzeugen, um die Auswahl des im Konzept verwendeten Werkzeugs zu begründen.

Im dritten Kapitel werden die Anforderungen an das zu erstellende Konzept ausgearbeitet. Dazu werden Voraussetzungen sowohl aus Sicht des Traceability-Konzepts als auch aus Sicht der Simulation erarbeitet. Anschließend wird die Simulationsaufgabe mit Hilfe der erarbeiteten Anforderungen näher klassifiziert und der Modellrahmen näher abgegrenzt. Dies dient der exakten Formulierung der Aufgabendefinition und bildet die Grundlage für die folgenden Schritte.

Der erste Schritt der Konzeptentwicklung erfolgt im vierten Kapitel mit der Entwicklung des Traceabilitysystems. Um die Daten und Parameter, die durch das Modell aufgenommen werden sollen, festzulegen, werden zunächst die Prozesse und die rückverfolgbaren Objekte charakterisiert und definiert. Mit Hilfe dieser Informationen werden die einzelnen Parameter hergeleitet und die Aufnahmequellen sowie die Art der Identifizierung der benötigten Daten bestimmt. Diese Parameter charakterisieren das Traceability-Konzept und helfen dabei, eine Auswahl der Identifizierungstechnik zu treffen.

Im Anschluss an die Entwicklung des Traceabilitykonzepts folgt im fünften Kapitel darauf aufbauend die Entwicklung des Simulationsmodells. Ausgehend von den vorher definierten Prozessen und Daten wird das Simulationsmodell angelehnt an das im vorherigen Kapitel vorgestellte Vorgehensmodell entwickelt. Dazu wird das betrachtete System mit seinen Wirkzusammenhängen analysiert und anschließend formal modelliert. Das vollständige Modell entsteht durch Implementierung des formalen Modells. Als Nachweis, dass das Simulationsmodell sinnvolle Ergebnisse liefert, die auf die Realität übertragbar sind, wird es im Anschluss an jede Phase der Modellerstellung validiert und verifiziert.

Nachdem das Konzept allgemein vorgestellt und entwickelt wurde, wird es im sechsten Kapitel auf einen exemplarischen Fertigungsbereich angewendet. Dazu wird das entsprechende Simulationsmodell erstellt. Durch Simulationsläufe mit unterschiedlichen Parameterkonstellationen wird die Funktionsweise verdeutlicht. Die aus den Simulationsläufen entstehenden Ergebnisse werden ausgewertet und daraus Optimierungspotentiale für das vorgestellte Beispiel abgeleitet. Ein anschließendes Fazit bewertet das entstandene Gesamtkonzept und führt Handlungsempfehlungen auf. Das letzte Kapitel fasst das entstandene Modell mit seinen Eigenschaften und Funktionen zusammen.

## 2 Grundlagen

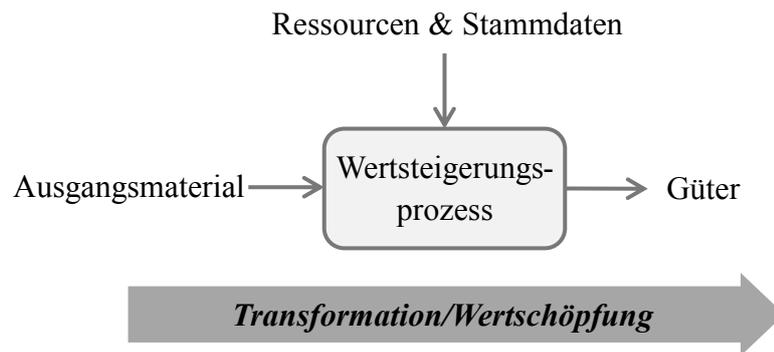
Im folgenden Kapitel werden die notwendigen Grundlagen, die für die Erstellung des Konzepts benötigt werden, systematisch aufgearbeitet. Dazu werden zuerst die grundlegenden Begriffe im Bereich der Produktions- und Logistikprozesse erklärt. Damit ein Gesamtkonzept, das sowohl die Potentiale der Traceability als auch die der Simulation bestmöglich ausschöpft, entwickelt werden kann, werden nachfolgend beide Themen detailliert vorgestellt. Dazu gehören im Bereich der Traceability neben den grundlegenden Definitionen und Anwendungsmöglichkeiten auch die praktischen Aspekte wie die anwendbaren Vorgehensweisen und eingesetzten Technologien. Im Bereich der Simulation müssen ebenso die grundlegenden Aspekte vorgestellt werden, bevor eine detaillierte Einsicht mit den Komponenten, dem Vorgehen einer Simulation sowie unterschiedlichen Simulationswerkzeugen erfolgen kann.

### 2.1 Grundlagen zu Produktions- und Logistikprozessen

Im ersten Abschnitt werden die Begriffe Produktion und Produktionslogistik definiert und deren Inhalte erläutert. Anschließend wird eine Möglichkeit zur Klassifizierung von unterschiedlichen Produktionsunternehmen vorgestellt. Der Übergang zu den beiden Kernthemen dieser Arbeit, der Traceability und der ereignisdiskreten Simulation, wird durch eine Darstellung des aktuellen Stands der IT-Unterstützung in der Produktionsumgebung, durch die Themen Digitale Fabrik und Industrie 4.0, gegeben.

#### 2.1.1 Produktion und Produktionslogistik

Eine Fabrik, oft auch als Werk oder Produktionsbetrieb bezeichnet, ist ein „Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet“ (VDI 5200 Blatt 1). Dabei umfasst die Produktion alle an der Produktherstellung beteiligten Tätigkeiten, die zur betrieblichen Leistungserstellung erforderlich sind. Zu diesen Tätigkeiten zählen neben Prozessen wie dem Konstruieren oder der Erstellung von Arbeitsplänen, insbesondere das Fertigen, Montieren, Lagern, Transportieren, Warenvereinnahmen und Versenden. Zu den Bestandteilen einer Produktion gehören außerdem Prozesse wie das Prüfen, Planen, Steuern oder Hilfsprozesse wie das Instandhalten (VDI 5200 Blatt 1). In Abgrenzung zur Produktion, die alle Prozesse im Produktlebenslauf umfasst, kann die Fertigung als ein Teilprozess in dieser Prozesskette gesehen werden (Westkämper 2006).



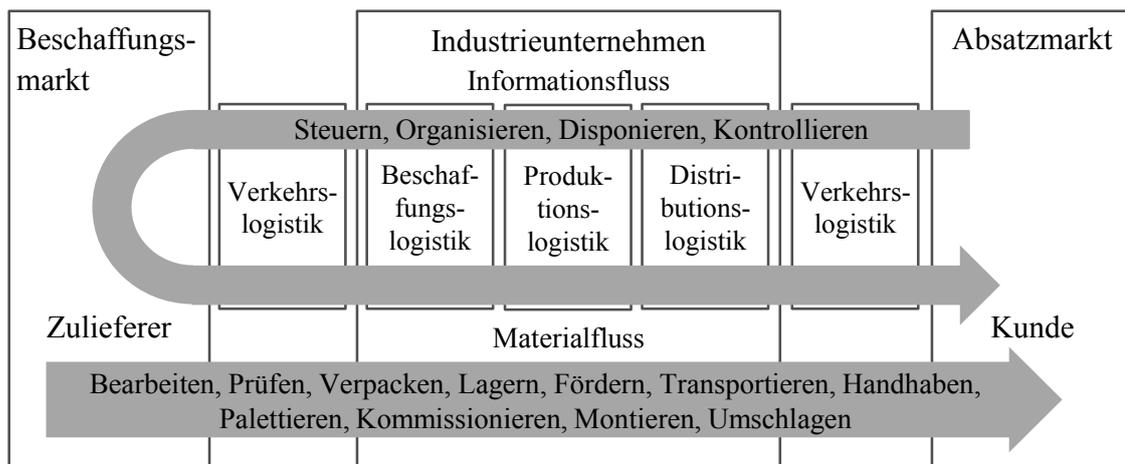
**Abbildung 2-1** Produktionsprozess in Anlehnung an Kummer und Groschopf (2013, S. 40) und Jammernegg und Poiger (2013, S. 206)

Die Durchführung der Prozesse in der Produktion verfolgt das Ziel, dem Markt Leistungen mit einem möglichst großen Wertschöpfungsanteil zur Verfügung zu stellen. In einer Produktion werden daher, wie in Abbildung 2-1 dargestellt, mit Hilfe von Ressourcen und Stammdaten Ausgangsmaterialien zu wertgesteigerten Gütern transformiert (Jammernegg und Poiger 2013). Die Ressourcen unterteilen sich in die für den Produktionsprozess benötigten technischen und personellen Ressourcen. Die technischen Ressourcen beinhalten die Betriebsmittel, also alle Einrichtungen und technischen Anlagen, die für den Prozess notwendig sind. Die für den Leistungsprozess notwendigen personellen Ressourcen umfassen nicht nur die Mitarbeiter bei der Produktion, sondern auch die, die in der Vorbereitung oder der Güterverteilung tätig sind. Die Informationen, die für den Produktionsprozess notwendig sind, wie Arbeitspläne, Stücklisten und Kapazitätsdaten bilden die zur Transformation verwendeten Stammdaten (Jammernegg und Poiger 2013, S. 206 f.; Kummer und Groschopf 2013, S. 40 f.).

Die für die Produktion benötigten Ausgangsmaterialien können in vier unterschiedliche Werkstoffgruppen eingeteilt werden. Rohstoffe sind die Stoffe, die einen wesentlichen Anteil an dem Fertigungserzeugnis haben, wohingegen Hilfsstoffe zwar Bestandteil des Enderzeugnisses sind, allerdings nur einen unwesentlichen Anteil einnehmen, da sie zum Beispiel im Verhältnis zu den anderen Werkstoffen einen geringen Wert haben. Werkstoffe, welche kein Bestandteil des Endprodukts sind aber während der Produktion verbraucht werden, werden als Betriebsstoffe bezeichnet. Eine letzte Gruppe bilden die Zulieferteile, welche halbfertig und fertig bezogene Teile beschreiben, die in das Endprodukt eingehen (Kummer und Groschopf 2013, S. 41).

Aktivitäten, die zur Ver- und Entsorgung der Fertigung erforderlich sind, werden unter dem Begriff Produktionslogistik zusammengefasst (VDI-Richtlinie 4401). Die Planung, Steuerung, Lagerung und der Transport von allen Werkstoffen (Rohmaterialen, Hilfs- und Betriebsstoffen, Kauf- und Ersatzteilen oder Halbfertig- und Fertigprodukten) sowie die damit verbundenen organisatorischen oder qualitätssichernden Maßnahmen werden mit ihr beschrieben (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 238). Die Produkti-

Produktionslogistik kann als Spezialgebiet der Produktion aufgefasst werden und ist geprägt durch eine intelligente Ablauf- und Bereitstellungsplanung (Gleissner und Femerling 2008). Weitreichender hingegen ist die Intralogistik, da sie alle innerbetrieblichen Material- und Informationsflüsse beinhaltet. Wie in Abbildung 2-2 dargestellt, gehören neben der Produktionslogistik auch die Beschaffungs- und die Distributionslogistik, also die Schnittstellen zum Beschaffungs- und Absatzmarkt, zur Intralogistik. Das Supply Chain Management bezeichnet dabei das Management aller logistischen Funktionen dieser Versorgungskette (Supply Chain), die vom Lieferanten bis zum Kunden geht (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 300 f.).



**Abbildung 2-2** Einordnung der Produktionslogistik nach Vastag (2008, S. 406)

Da der Materialfluss und der Informationsfluss untrennbar miteinander gekoppelt sind (VDI-Richtlinie 2689 Entwurf) ist deren Synchronizität notwendig, um eine gut funktionierende Logistik zu erzielen (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 141 f.). Mit dem Informationsfluss werden alle Informationen, die zur Erfüllung eines Kundenwunsches notwendig sind, geplant, gesteuert und überwacht (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 136). Der Materialfluss hingegen beschreibt die Verkettung aller Vorgänge bei der Gewinnung, Be- und Verarbeitung sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb eines definierten Bereichs. Er umfasst alle Arbeitsgegenstände, die ein System durchlaufen und beinhaltet Prozesse wie Bearbeitung, Prüfung, Handhabung, Förderung, Aufenthalt und Lagerung (VDI-Richtlinie 2689 Entwurf).

### 2.1.2 Klassifizierung von Produktions- und Logistikprozessen

Eine Produktion charakterisiert sich maßgeblich durch die Art und Weise der Auftragsabwicklung und die dadurch resultierende Ablauf- und Aufbauorganisation. Eine Möglichkeit, um eine grobe Analyse durchzuführen, bietet das in Tabelle 2-1 dargestellte morphologische Merkmalschema. Mit Hilfe von 12 Merkmalen, die sich in die vier Gruppen Initial, Erzeugnis, Disposition und Fertigung einordnen, kann eine einfache Klassifizierung eines Systems erfolgen (Schuh und Schmidt 2006, S. 121). Je nach

Merkmalsausprägung können somit unterschiedliche Typen von Produktionsunternehmen zusammengefasst werden, wobei die technischen und physikalischen Prinzipien, die das Unternehmen anwendet, nicht einbezogen werden. Beispielsweise können die vier grundlegenden Typen Auftrags-, Rahmenauftrags-, Varianten- und Lagerfertiger genannt werden. Der Typ Auftragsfertiger hat als Initialmerkmal die Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen. Bei ihm ist der Einfluss von Kundenänderungen in der Fertigung hoch und die Fertigungsart ist die Einmalfertigung. In Tabelle 2-1 sind die Merkmale dieses Typs in der linken Hälfte der Spalte Ausprägung aufgeführt.

Gegensätzlich zu diesem Typen ist der Typ Lagerfertigung, bei dem die Produktion auf Lager erfolgt. Die Merkmalsausprägungen dieses Typs finden sich dementsprechend auf der rechten Seite der Tabelle. Bei diesem Typ werden Standarderzeugnisse in der Massenfertigung produziert und dementsprechend können kaum Kundenwünsche Beachtung finden.

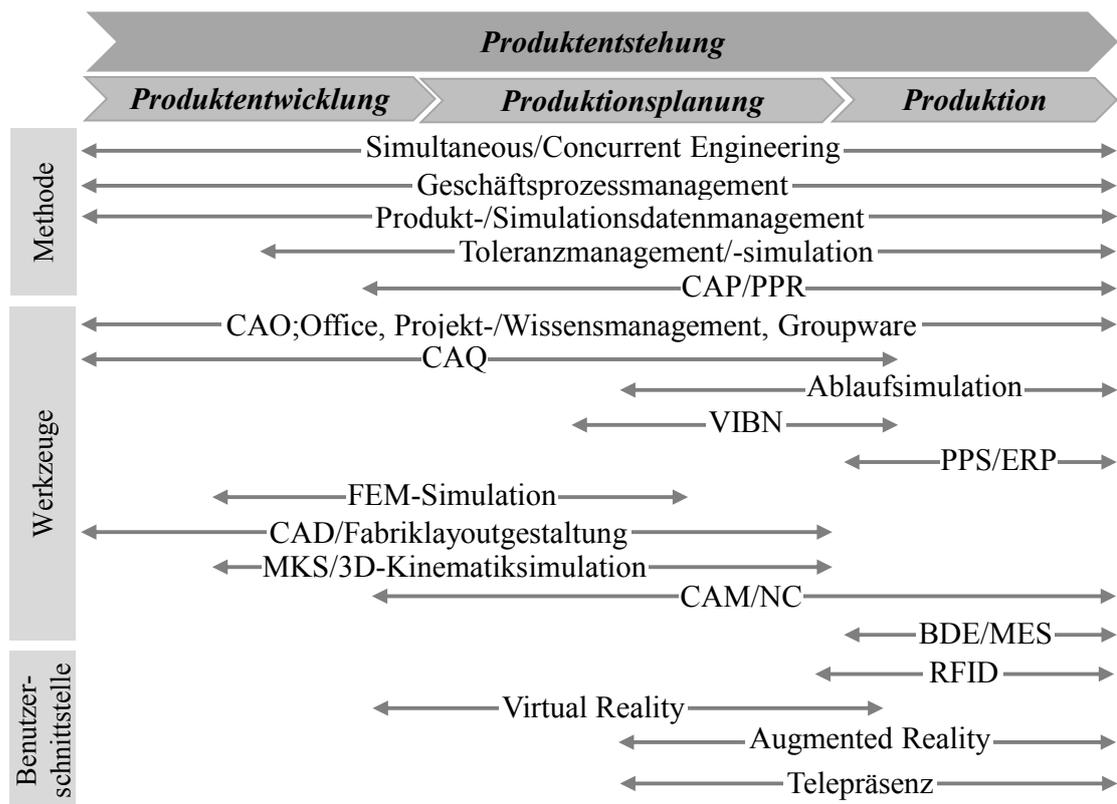
Die Typen Rahmenauftrags- und Variantenfertiger liegen zwischen diesen beiden extremen Ausprägungen. Bei ihnen werden zum Beispiel variantenreichere Produkte unter teilweisem Einfluss von Kundenwünschen und mittlerer Komplexität gefertigt.

**Tabelle 2-1** Merkmalsstrukturen der Auftragsauslösungsart nach Schuh und Schmidt (2006, S. 121)

<i>Merkmalsart</i>	<i>Merkmale</i>	<i>Ausprägung</i>
<b>Initialmerkmal</b>	Auftragsauslösungsart	Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen ... Produktion auf Lager
<b>Erzeugnismerkmale</b>	Erzeugnisspektrum	nach Kundenspezifikation ... Standarderzeugnisse ohne Varianten
	Erzeugnisstruktur	mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur ... geringteilige Erzeugnisse
<b>Dispositionsmerkmale</b>	Ermittlung des Erzeugnis-/Komponentenbedarfs	bedarfsorientiert ... verbrauchsorientiert
	Auslösung des Sekundärbedarfs	auftragsorientiert ... periodenorientiert
	Beschaffungsart	Fremdbezug hoch ... Fremdbezug gering
	Bevorratung	Keine Bevorratung von Bedarfspositionen ... Bevorratung von Erzeugnissen
<b>Fertigungsmerkmale</b>	Fertigungsart	Einmalfertigung ... Massenfertigung
	Ablaufart in der Teilefertigung	Werkstattfertigung ... Fließfertigung
	Ablaufart in der Montage	Baustellenmontage ... Fließmontage
	Fertigungsstruktur	geringer Strukturierungsgrad ... hoher Strukturierungsgrad
	Kundenänderungseinflüsse während der Fertigung	in großem Umfang ... unbedeutend

### 2.1.3 Digitale Fabrik und Industrie 4.0

Das digitale Abbild einer Fabrik wird als Digitale Fabrik (engl. Digital Factory) bezeichnet und umfasst, wie in Abbildung 2-3 dargestellt, das gesamte Netzwerk an Modellen, Methoden und Werkzeugen der Produktentwicklung, Produktionsplanung und Produktion. Das Ziel dieser Techniken ist „die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik“ (VDI-Richtlinie 4499 Blatt1). In der Produktionsplanung und der Produktion umfasst sie Werkzeuge wie die Ablaufsimulation, PPS oder ERP Systeme aber auch Benutzerschnittstellen wie RFID, BDE oder auch MES (Schack 2007, S. 25).



**Abbildung 2-3** Techniken der Digitalen Fabrik nach (Schack 2007, S. 25)

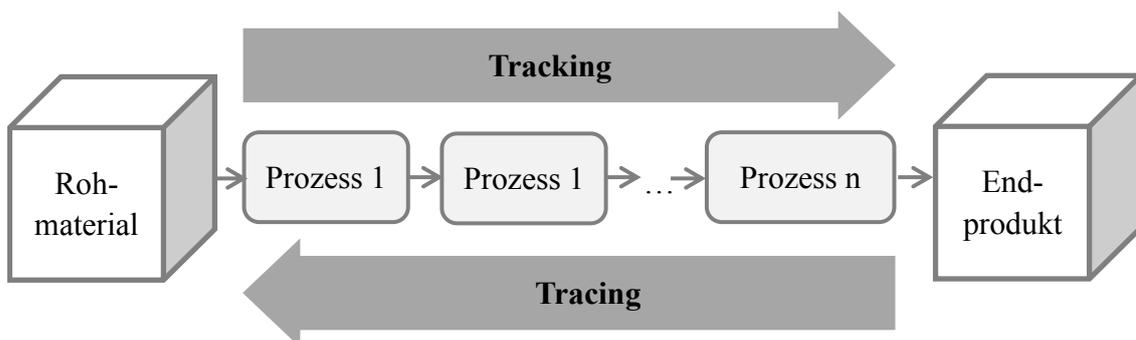
Das Konzept der Digitalen Fabrik umfasst in der Realität eine Reihe von Teilkonzepten mit isolierten Lösungsansätzen. Ein solches Konzept ist das der Industrie 4.0, welches in Deutschland entwickelt wird. Im Wesentlichen beinhaltet dieses Konzept, das auch als vierte industrielle Revolution bezeichnet wird, die Vernetzung der virtuellen Computerwelt mit der physischen Welt. Die Vernetzung der unterschiedlichen Welten erfolgt dabei durch den Einsatz von Cyber-Physischen Systemen (CPS), also Systemen, die in der Lage sind, Produktionssysteme überwiegend selbständig zu steuern, zu optimieren und zu konfigurieren (Hirsch-Kreinsen 2014, S. 3). Mit Hilfe solcher CPS, die sich dezentral und echtzeitnah organisieren, entsteht die sogenannte smarte Fabrik. Grundlage dafür ist, dass die Daten aus der Fabrik in Echtzeit zu Verfügung stehen (Bauernhansl 2014, S. 16).

## 2.2 Traceability in innerbetrieblichen Produktions- und Logistikprozessen

### 2.2.1 Definition und Klassifizierung

Die Möglichkeit, Daten zur Rekonstruktion eines Sendungsverlaufs zu erfassen, wird als Traceability bezeichnet und erzeugt eine besondere Transparenz in allen Stufen der Supply Chain (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 309). Mit Hilfe dieser Rückverfolgung und Verfolgung von Losen, Chargen oder Produkten kann die gesamte Entstehung von Endprodukten ausgehend vom Wareneingang bis zu den fertigen Endprodukten über die gesamte Wertschöpfungskette ermittelt werden. Voraussetzung dafür ist, dass der physische Warenfluss mit dem Informationsfluss verbunden ist (Kletti 2006, S. 171 f.).

Der Einsatz der Traceability kann sowohl intern als auch extern erfolgen. Die interne Traceability wird meist verwendet, um gesetzlichen oder internen Regularien zu genügen und benötigt lediglich eine interne lückenlose Verfolgung. Bei der externen Traceability hingegen werden die Objekte über die gesamte Supply Chain und damit über die Unternehmensgrenze hinaus verfolgt. Diese Form erfordert eine einheitliche Identifikationstechnik, sodass der Waren- und Informationsfluss unter den unterschiedlichen Anwendern ermöglicht wird. Dabei existieren unterschiedliche Datenverwaltungsarten, je nachdem ob die Daten auf einem zentralen Server für alle Beteiligten bereit stehen oder jeweils an den Übergabepunkten in Form eines Punkt-zu-Punkt Informationsflusses übergeben werden (Weckenmann et al. 2014, S. 842 ff.).



**Abbildung 2-4** Tracking und Tracing in Anlehnung an Weckenmann et al. (2014, S. 842)

Die Traceability kann, wie in Abbildung 2-4 deutlich wird, generell in die beiden Funktionen Tracking (Verfolgbarkeit) und Tracing (Rückverfolgbarkeit) unterteilt werden. Dabei bezeichnet das Tracking die vorwärts-gerichtete (auch abwärts-gerichtete) Verfolgung, wohingegen das Tracing die rückwärts-gerichtete (auch aufwärts-gerichtete) Verfolgung/Rückverfolgung beschreibt (Weckenmann et al. 2014, S. 841 f.; ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 309). Synonyme Begriffe sind auch das Downstream Tracing

(für Tracking) und das Upstream Tracing (für Tracing) (Hofbauer und Sangl 2011, S. 465). Beim Tracking wird die logistische Kette, angefangen beim Rohmaterial bis hin zum Endprodukt, verfolgt und alle Elemente und Behandlungsparameter werden dokumentiert, der Weg einer bestimmten Einheit in der Lieferkette wird also mitverfolgt. Zu den gesammelten Produktions- und Prozessdaten gehören beispielsweise der durchlaufene Arbeitsplatz, zugehörige Mitarbeiter, der Bearbeitungsanfang und das Bearbeitungsende, aber auch benötigte Materialien, wie verbaute Baugruppen oder Komponenten. Aus den gewonnenen Trackingdaten kann anschließend eine Optimierung der Warenflüsse und Prozesse erfolgen und die bestmögliche Auslastung der Kapazitäten ermöglicht werden (Kletti 2013; Weckenmann et al. 2014, S. 841; Wegner-Hambloch und Springob 2004b, S. 59).

Das Tracing hingegen beschreibt die rückwärtsgerichtete Verfolgung oder Rückverfolgbarkeit eines Endproduktes bis zu den verwendeten Rohmaterialien, Komponenten und Behandlungsparametern, um die Herkunft einer Einheit nachzuvollziehen (Wegner-Hambloch und Springob 2004b, S. 60). Bei fehlerhaften Endprodukten können so im Sinne der Qualitätssicherung Rückschlüsse auf die Fehlerursache gezogen werden. In Kombination mit dem Tracking können weitere eventuell betroffene Objekte identifiziert werden (Weckenmann et al. 2014, S. 841). Neben dem Tracking und Tracing kann die Traceability nach Kottig (2015) außerdem um die Dimension Control erweitert werden. Diese beantwortet nach dem Ist-Stand (Track) und der Vergangenheit (Trace) des Objekts auch die Fragen nach der Zukunft und gibt an, ob das Objekt für den folgenden Prozess geeignet ist oder aufgrund von Fehlern für die Weiterverarbeitung gesperrt ist.

Die Traceability wird üblicherweise zusätzlich durch die Art der aufgenommenen Daten in Produkt- und Prozesstraceability unterteilt. Die Prozesstraceability nimmt den Fertigungs-/Herstellungsweg eines Produkts auf und birgt damit erhebliche Verbesserungspotenziale für die Qualität der Produkte, da durch die höhere Fertigungstransparenz detaillierte Informationen vorliegen. Die für die Herstellung benötigten Prozesse und die wesentlichen Prozessdaten wie Bearbeitungsparameter, Prozessergebnisse und Maschineneinstellungen werden dazu aufgenommen. Damit ist zum Beispiel genau ersichtlich, mit welchen Maschinen und Mitarbeitern ein Objekt gefertigt wurde.

Bei der Produktraceability hingegen wird der Herstellungsweg nachverfolgt und dabei wird ermittelt, welches Bauteil in welchem Los, in welches Produkt, für welchen Auftrag verbaut wird. Außerdem wird zu jedem Bauteil auch noch festgehalten, aus welcher Charge von Vorprozessen oder von welchem Lieferanten es stammt (Weckenmann et al. 2014, S. 843). Für diese Art der Traceability ist neben der Aufnahme des vollständigen Materialflusses auch die Erfassung der Rüstungen an allen Maschinen und Montageplätzen notwendig. Das Kernziel ist der Erhalt von detaillierten Informationen zu den verbauten Bauteilen und Materialien, um zum Beispiel eine schnelle Prozessverriege-

lung im Schadensfall zu ermöglichen. Wird eine fehlerhafte Charge ermittelt, können schnell alle Bauteile, in die die Charge verbaut wurde, ermittelt werden. Die Prozessverriegelung verhindert damit, dass sich Fehler durch die weitere Wertschöpfungskette ziehen (Erhard 2006).

Eine andere Aufteilung der durch die Traceability generierten Daten ist die der Teilung in Material-, Prüf- und Prozess-Traceability. Diese drei Datenarten bilden mit den beiden Stufen Prozessverriegelung und Prozessverbesserung ein fünf Stufen System. Dabei werden in der ersten Stufe Materialdaten, wie die Bauelemente oder auch Betriebsstoffe, aufgenommen und erst in der nächsten Stufe die Ergebnisse der Prüfprozesse. In der dritten Stufe, der Prozess-Traceability, werden üblicherweise die Prozessdaten aufgenommen. Die Datenaufnahmen werden anschließend von der übergeordneten Prozessverriegelung freigegeben oder verriegelt, abhängig davon, ob die Daten den Vorgaben entsprechen. Die oberste Stufe, die Prozessverbesserung, ermöglicht mittels Online-Reporting und entsprechender Kennzahlen eine Darstellung des Qualitätslevels, sodass kleine Regelkreise und somit schnelle Reaktionen auf Abweichungen erfolgen können (Hofbauer und Sangl 2011, S. 467; Beine 2010).

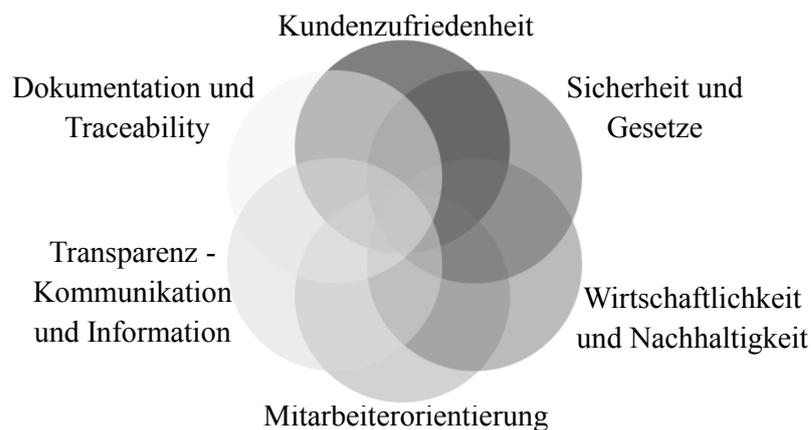
### **2.2.2 Anwendungsgebiete und Potentiale der Traceability**

Typisches Einsatzgebiet der Traceability ist die pharmazeutische Industrie, bei der es schon lange Richtlinien gibt, welche festlegen, dass bei den vorgelagerten Herstellungsschritten jeweils der Lieferant und der Abnehmer nachverfolgbar sein müssen. Insgesamt wird in allen Bereichen der Medikamenten-/Pharmaindustrie und der Lebens- und Futtermittelindustrie die Rückverfolgbarkeit immer wichtiger. So existieren zum Beispiel in der Lebensmittelindustrie eine Reihe von gesetzlichen Regularien, wie etwa die Verordnung 178/2002, die die Anforderung eines Traceabilitysystems im Bereich Lebens- und Futtermittel definiert. Alle Produktions-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen müssen durch die im Jahr 2005 verabschiedete Verordnung zurückverfolgt werden können, um eine Gesundheitsgefährdung des Verbrauchers auszuschließen. Dabei kann dies einerseits durch Auslieferungsstopps, Warenrücknahmen oder einen öffentlichen Rückruf geschehen. Andererseits können zukünftige Gefährdungen durch das schnelle Identifizieren der Fehlerursache vermieden werden (Wegner-Hambloch 2004a, S. 9; Franke und Dangelmaier 2006, S. 90; Resl und Windischbauer 2006; ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 89).

Neben den Einsatzgebieten, in denen die Traceability durch gesetzliche Grundlagen klar geregelt ist, werden die Forderungen, den Werdegang von Produkten aufzuzeichnen, in Unternehmen vieler Industriebranchen immer häufiger. In der Elektronik und Automobilindustrie setzen sich Hersteller immer intensiver mit dem Thema Traceability auseinander (Erhard 2006). So erwarten viele Kunden in der Elektronikindustrie heutzutage eine lückenlose Rückverfolgbarkeit entlang der gesamten Lieferkette, um alle verwen-

deten Bauteile identifizieren zu können (ifm Datalink 2013). In der Automobilindustrie verursacht eine steigende Anzahl an Rückrufaktionen enorme Kosten, sodass gerade marktführende Endabnehmer ihre Zulieferer dazu verpflichten, lückenlose Informationen zu den Produkten zu übermitteln (Kreppenhofer und Langer 2006; Abramovici et al. 2008). Insgesamt gewinnt also die Rückverfolgbarkeit aus wirtschaftlichen Gründen in vielen Unternehmen zunehmend an Bedeutung. Aber auch Verordnungen oder gesetzliche Grundlagen wie etwa das Produkthaftungsgesetz oder das Geräte- und Produktsicherheitsgesetz begründen den vermehrten Einsatz. So sind beispielsweise Qualitätsnachweise ohne Rückverfolgung nicht denkbar (Abramovici et al. 2008). Dies führt dazu, dass in bestimmten Branchen ein Traceabilitysystem zukünftig ein wichtiges Zulassungskriterium sein wird, um eine Liefererlaubnis zu erhalten (Hofbauer und Sangl 2011, S. 188).

Der Einsatz von Traceabilitysystemen dient dabei aber nicht nur der Erfüllung von gesetzlichen Vorschriften, sondern entwickelt sich zunehmend zu einem strategischen Unternehmensfaktor (Kletti 2006, S. 191 f.; Fischer 2006, S. 189). Viele Faktoren bewirken, dass sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette wirtschaftliche Vorteile offenbaren. Neben der puren Qualitätssicherung ergeben sich ganzheitliche Optimierungen der Prozesse, welche sowohl Vorteile im Bereich der Kosten, der Zeit oder auch der Kundenzufriedenheit bewirken. Neben der Optimierung hilft die Traceability dem Unternehmen auch dabei, sich von den Wettbewerbern abzugrenzen, indem sie weitere Dienstleistungen und Funktionen wie etwa das Online-Tracking anbietet (Hofbauer und Sangl 2011, S. 466 f.).



**Abbildung 2-5** Maximen des Qualitätsmanagements nach Weckenmann et al. (2014, S. 837)

Die Traceability wird zusammen mit der Dokumentation als eine der Maximen des Qualitätsmanagements (vergleiche Abbildung 2-5) bezeichnet, da sie vielfältige Potentiale in diesem Bereich besitzt (Weckenmann et al. 2014, S. 837). Ziel der Bestrebungen des Qualitätsmanagements ist die vollständige Vermeidung von Warenrückrufen (Fischer 2006). Dies kann, wie bereits beschrieben (vgl. Abschnitt 2.2.1), durch die Verriegelung

der Prozesse mit Hilfe der Produkttraceability erfolgen. Für den Fall, dass dennoch Rückrufaktionen zu fehlerbehafteten Produkten erfolgen, kann durch den Einsatz der Traceabilitysysteme gewährleistet werden, dass diese ressourcenschonend (in Bezug auf Kosten und Zeit) ausgeführt werden und somit ein schneller Aufruf der durchgängig erfassten Daten möglich ist. Werden hingegen statt eines ganzheitlichen Traceabilitysystems individuelle Lösungen für die Speicherung solcher Daten genutzt, können diese im Schadensfall in der Regel nur sehr aufwendig beschafft werden. Vollständig vernetzte Systeme hingegen ermöglichen einen effizienten Zugriff auf die Daten.

Durch die Echtzeitverfolgung von ermittelten Qualitätskennzahlen können nötige Verbesserungen an Prozessen schnellstmöglich umgesetzt werden. Mit Hilfe der Traceability werden die Prozesse daher idealerweise bereits verbessert, bevor überhaupt ein Schaden entsteht. Die gewonnenen Fertigungsdaten können analysiert und so Prozesseinstellungen nachhaltig optimiert und somit das Qualitätsniveau erhöht werden (Hofbauer und Sangl 2011, S. 468).

Neben den Effekten, die die Qualität der hergestellten Produkte beeinflussen können, birgt die Traceability weitere Synergieeffekte, die eine Optimierung der Abläufe innerhalb des Tagesgeschäfts ermöglichen (Abramovici et al. 2007). Eine hohe Fertigungseffizienz und Produktivität kann durch den Einsatz der Traceability erzielt werden. Dazu können die Nutzungsgrade der einzelnen Maschinen direkt erfasst und dargestellt werden und ermöglichen so direkte Anpassungen und Verbesserungen. Durch die detaillierteren Informationen können Rückschlüsse gezogen werden, die ohne diese Daten nicht getroffen worden wären. Die gewonnenen Daten liefern zum Beispiel Aufschluss darüber, wann Wartungen notwendig werden, sodass diese frühzeitig planbar sind (Hofbauer und Sangl 2011, S. 468). Durch die erzielten Optimierungen der Prozesse können schlussendlich bessere Durchlaufzeiten der Produkte erreicht werden. Weitere Verbesserungen treten durch die Überwachung und Visualisierung des gesamten Fertigungsprozesses auf. Die Verknüpfung von verschiedensten Daten der Fertigung erzeugt eine hohe Transparenz in der internen Wertschöpfungskette und die Warenflüsse und Warenbestände können überwacht und kontrolliert werden (Schönle 2011; Hofbauer und Sangl 2011, S. 468; Kletti 2006, S. 192).

Aus Kundensicht bietet die Traceability neben der aktiven Benachrichtigung bei Rückrufen außerdem ein zusätzliches Leistungsmerkmal, welches das Unternehmen von Konkurrenten, die diese Funktion nicht einsetzen, abgrenzt. Der Wunsch des Kunden nach Sicherheit und Information über die Herkunft des Produkts kann befriedigt werden. Ein weiteres Merkmal, welches einen Vorteil für den Kunden bietet, ist der Schutz vor Plagiaten. Dieser Schutz erfolgt durch den Einsatz von eindeutigen Identifizierungsmethoden, die dem Kunden und dem Händler geliefert werden (Hofbauer und Sangl 2011, S. 468; Böse und Uckelmann 2006, S. 135).

Aus wirtschaftlicher Sicht ist ein Traceabilitysystem dauerhaft nicht nur durch eine Produktionskostensenkung infolge der Verbesserung der Prozesse angebracht. Ferner werden Kostensenkungen durch die Einhaltung von hohen Qualitätsstandards erzielt, da weniger Ausschuss produziert wird und Imageschädigungen durch Warenrückrufe vermieden werden. Bei der Konzeptionierung eines Traceabilitysystems ist allerdings ein permanentes Abwägen zwischen Praktikabilität und Wirtschaftlichkeit gefordert. Andernfalls übersteigen die Kosten des Systems durch unnötige Funktionen oder eine unnötig hohe Detailtreue den Nutzen, den es erbringen kann. Insgesamt lassen sich jedoch die Kosten durch ein derartiges System bei sinnvoller Nutzung der gewonnenen Daten schnell amortisieren (Hofbauer und Sangl 2011, S. 467; Schönle 2011; Fischer 2006, S. 188 f.).

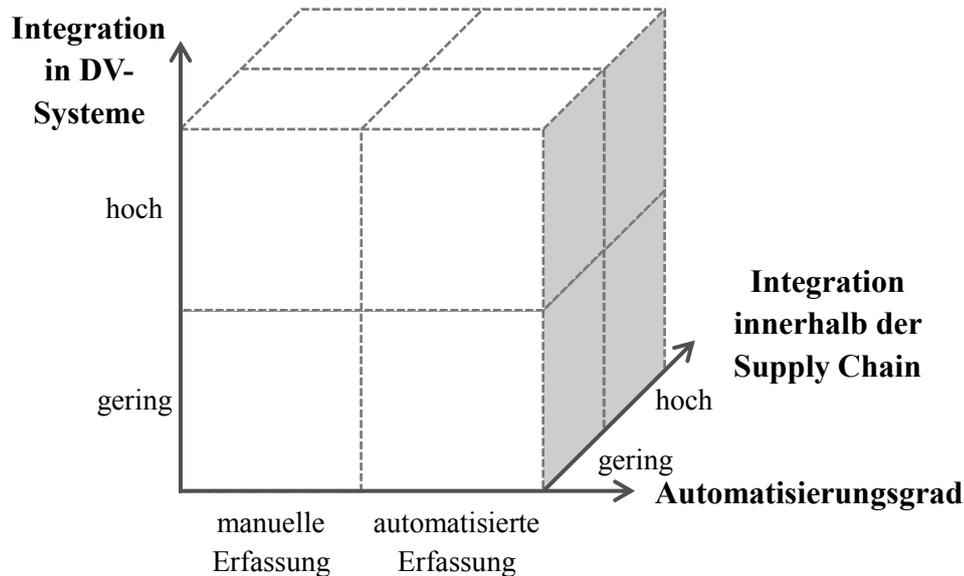
Da die Einführung eines Traceabilitysystems in ein bestehendes Produktionssystem eine enorme Herausforderung ist (Schönle 2011), müssen einige Faktoren erfüllt werden, damit die Potentiale optimal ausgenutzt werden können. Ein wichtiger Punkt sind die Daten, die wie bei jeglicher Form von Datenübertragung im Produktionsumfeld, in einer standardisierten Form vorhanden sein sollten, um allen Beteiligten einen schnellen und einfachen Zugriff ohne vorhergehende Konvertierungen oder Anpassungen zu ermöglichen (Gleissner und Femerling 2008).

Neben der einfachen Datenverwaltung sind weitere Erfolgsfaktoren für den Traceabilityeinsatz wichtig. Das System sollte einfach handhabbar, also benutzerfreundlich und intuitiv bedienbar sein. Außerdem sollte es flexibel implementierbar, modulierbar und skalierbar sein. Das heißt, es sollte einfach an unterschiedliche Systeme angeschlossen werden können sowie an neue Bedingungen einfach anpassbar sein. Um eine vollständige Rückverfolgbarkeit ohne Unterbrechungen zu ermöglichen, sollte es außerdem eine hohe Systemstabilität und Verfügbarkeit gewährleisten (ifm Datalink 2013).

### **2.2.3 Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Traceabilitysystems**

Traceabilitylösungen sind sehr variantenreich, da sie der Vielfältigkeit und Komplexität der unternehmenseigenen Prozesse gerecht werden müssen (Wegner-Hambloch und Springob 2004a, S. 61). Es bestehen kaum standardisierte Systeme, sodass jeweils individuelle Lösungen erarbeitet werden müssen. Bei den individuellen Lösungen gibt es einerseits Bestrebungen, die Daten für die Rückverfolgbarkeit aus den bereits bestehenden IT-Systemen zu gewinnen und andererseits werden, um zusätzlich noch weitere Vorteile der Traceability auszunutzen, unternehmensspezifische Insellösungen entwickelt und implementiert (Abramovici et al. 2007). Wie die ideale Lösung für einen Betrieb aussieht, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Abhängig von der spezifischen Branche existieren definierte Anforderungen, die zu erfüllen sind. In der Luft- und Raumfahrtindustrie wird beispielsweise gefordert, dass die gesamte Produktentstehung durch aufgezeichnete Prozessdaten nachvollziehbar ist (Weckenmann et al. 2014, S.

844). In der Lebensmittelindustrie muss jede Person, von der ein Unternehmer ein Lebensmittel erhalten hat, ermittelbar sein (Wegner-Hambloch 2004b, S. 13). Weitere Gründe, die zur Varianz der Lösungen führen, sind die individuellen Rahmenbedingungen wie zum Beispiel unternehmensinterne oder auch gesetzliche Vorgaben, welche die Umsetzung beeinflussen (Wegner-Hambloch und Springob 2004a, S. 61).



**Abbildung 2-6** Dimensionen von Traceabilitysystemen nach Einbock und Kummer (2006, S. 199)

Um die unterschiedlichen Systemarten zu klassifizieren, werden nach Einbock und Kummer (Einbock und Kummer 2006) drei Dimensionen differenziert, die in Abbildung 2-6 dargestellt sind. Eine Dimension ist der Integrationsgrad in der Wertschöpfungskette, also der von der Traceability umfasste Bereich. Dieser reicht vom internen Produktionsumfeld mit der Aufnahme der Daten in einem Teilbereich der Fertigung oder einem ganzen Werk bis hin zur Betrachtung der gesamten Supply Chain. Eine weitere Dimension ist die Integration der DV-Systeme, welche bestimmt, wie weit das Traceability System mit den bestehenden Systemen verknüpft ist. Detailliertere Informationen können durch die vollständige Anbindung an bestehende Systeme kurzfristig gewonnen werden, jedoch ist der Implementierungsaufwand auch deutlich höher und somit nicht in jedem Fall wirtschaftlich. In diesen Fällen bieten sich Stand-Alone-Systeme an. Der Automatisierungsgrad bildet die dritte Dimension und bestimmt die Form der Datenerfassung. Abhängig vom Durchsatz im System kann eine manuelle Erfassung, wie beispielsweise der Abgleich mit Listen oder aber Techniken, mit einem höheren Grad an Automatisierung, wie die Barcode- oder die RFID-Techniken, zielführend sein.

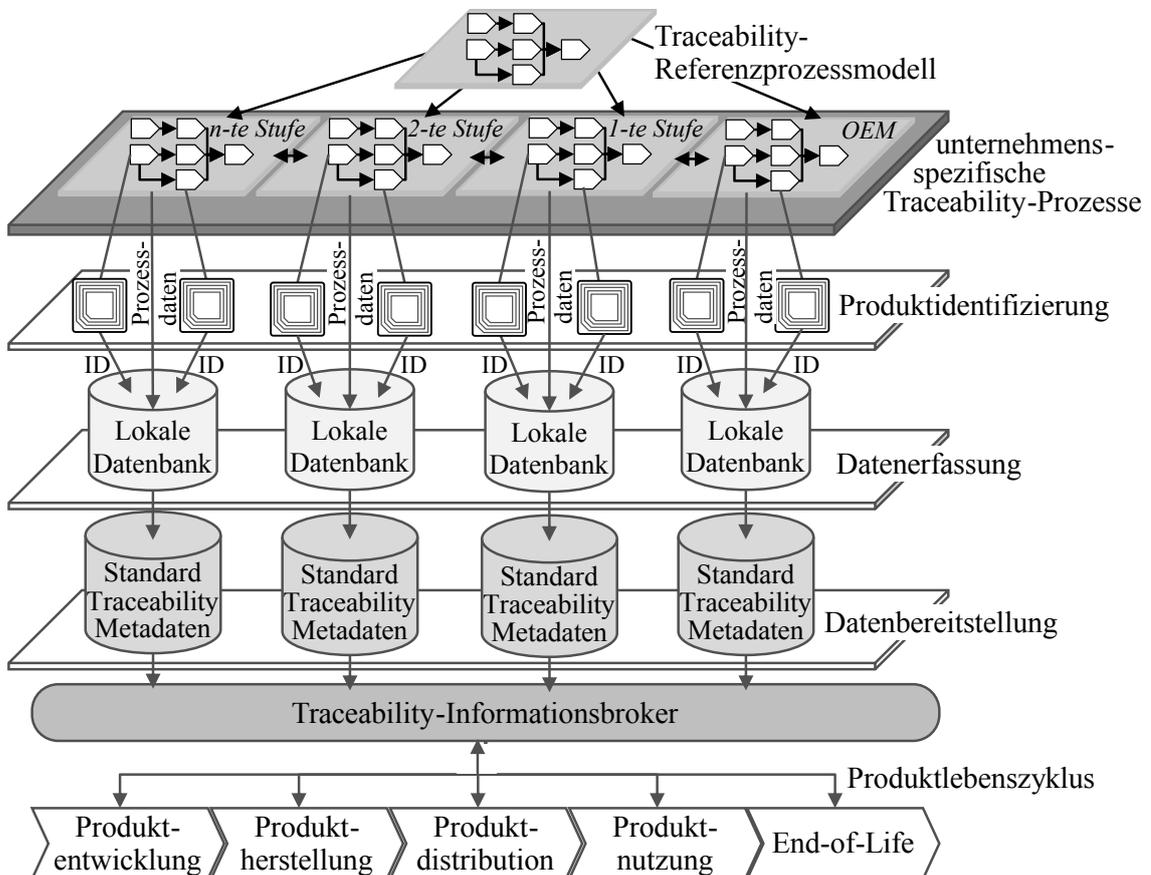
Unabhängig von der Systemart existieren grundlegende Rahmenbedingungen, die allgemeingültig sind. Sie stellen Anforderungen die jedes Traceabilitysystem erfüllen sollte. Ein wichtiger Punkt ist die Kennzeichnung der Produkte, die so eindeutig sein sollte, dass eine Identifikation während der gesamten Lebensdauer möglich ist und der Produktstatus mit der erforderlichen Mess- und Überwachungsanforderung während der Realisierung nachverfolgt werden kann. Zudem sollten die Komponenten und Produkte mit eindeutiger Kennzeichnung datentechnisch erfasst und bereitgestellt und die Daten aufrechterhalten werden. Neben den selbst aufgenommenen Daten sollte das System auch die von externen Unternehmen gelieferten Daten entsprechend verknüpfen und eine Kommunikation über eine geeignete Schnittstelle ermöglichen (Weckenmann et al. 2014, S. 844). Aus Industrie 4.0 Konzepten folgt außerdem die Anforderung der vertikalen und horizontalen Integration, also einerseits der Integration zwischen ERP-Systemen und der Produktion (vertikal) und andererseits entlang der Produktionsprozesse (horizontal). Die digitale Vernetzung dieser Daten ist eine Herausforderung in der Produktion (Bauernhansl et al. 2014, S. 594 f.; Kottig 2015).

Gewisse Elemente oder Aufgaben sind bei der Entwicklung eines Traceabilitysystems generell gültig. Eine moderne Traceabilitylösung besteht allgemein aus einer Codierung, einer Markiertechnik und einer Datenbank mit entsprechender Software und den passenden Verfahrensweisen (Schönle 2011), beziehungsweise aus den vier Kernelementen Identifikation, Datenerfassung und –archivierung, Verknüpfung und Kommunikation (Wegner-Hambloch und Springob 2004a, S. 61). Diese Funktionen werden durch drei Subsysteme, dem Kennzeichnungssystem, dem Identifikationssystem und dem Informationssystem, erfüllt (Weckenmann et al. 2014). Um die Herkunft der Produkte über alle Herstellungsphasen und logistischen Prozesse über die Wertschöpfungskette zu ermöglichen, muss die eindeutige Kennzeichnung der Produkte und Komponenten erfolgen (Kletti 2006, S. 190 f.). Neben der Form der Markierung wird mit dem Identifikationssystem eine geeignete Lesetechnik gewählt (Schönle 2011). Eine wichtige Querschnittsfunktion bildet das Informationssystem, da es alle Informationen und Daten zum Produkt und Prozess aufnimmt und archiviert (Fischer 2006, S. 188).

Produktspezifische Lösungen sind beim Entwurf eines Traceabilitysystems wichtig, da nur so individuelle Konzepte entstehen, bei denen die Elemente präzise aufeinander abgestimmt und eng miteinander verzahnt sind (Fischer 2006). Diese individuellen produktspezifischen Lösungen stehen jedoch im Widerspruch zu einer Durchgängigkeit entlang der Supply Chain, die den einfachen Austausch der Daten ermöglicht. Dies liegt daran, dass bei produktspezifischen individuellen Lösungen eine Standardisierung fehlt und somit hohe Entwicklungs- und Wartungskosten für die Synchronisation mit anderen Systemen anfallen. Zur Verbesserung dieser Situation gibt es verschiedene Gremien und

Konsortien, die Standards und Richtlinien für unterschiedliche Branchen, Produkte oder Teilearten definiert haben.

Ein Konzept, das ausgehend von der Automobilindustrie einen ganzheitlichen, durchgängigen und branchenübergreifenden Ansatz wählt, ist das von Abramovici, Bellalouna und Flohr (Abramovici et al. 2007, 2008, 2009). In diesem Konzept wird die Produkt-Rückverfolgbarkeit mit Hilfe der RFID-Technologie im metallischen Umfeld näher betrachtet, es lässt sich aber auch auf andere Technologien erweitern. Hierbei wird, wie in Abbildung 2-7 dargestellt, für jedes Unternehmen in der Supply Chain analog vorgegangen und die einzelnen Systeme können einfach miteinander verkettet werden. Dazu wird zwischen der Mikroebene, also der unternehmensinternen Einzellösung, und der Makroebene, also der unternehmensübergreifenden Verknüpfung der Einzellösungen, unterschieden.



**Abbildung 2-7** Allgemeines Vorgehensmodell der Traceability nach Abramovici et al. (2009)

Die Entwicklung und Einführung eines solchen Systems beginnt in diesem Konzept mit der Definition und Abgrenzung der Projektziele, auf die die Anforderungsdefinition und -analyse folgt. Stehen diese Rahmenbedingungen fest, folgt die Definition der Traceabilityprozesse, -daten und -datenmodelle. Zur Erstellung der Prozesse gibt es ein Referenzprozessmodell, welches vordefinierte Prozessbausteine, zum Beispiel für den Wa-

reneingang, den innerbetrieblichen Transport oder die Materialverarbeitung enthält. Die Prozesse können damit modular und unternehmensunabhängig methodisch gleich aufgebaut werden. Für die Definition der Datenmodelle sind die rückverfolgbaren Objekte (auch als Trace-Objekte bezeichnet) zu definieren und zu klassifizieren, um anschließend eine Art der Kennzeichnung auszuwählen. Darauf aufbauend werden die zu erfassenden Daten definiert und anschließend die benötigten Formate sowohl für die Kennzeichnung als auch für den Datenaustausch festgelegt. Sind die Prozesse und Daten definiert, wird ein geeignetes IT-System, also sowohl die Hardware als auch die Software, ausgewählt, angepasst und eingeführt. Zum Schluss folgt die Umsetzung zu einer Gesamtlösung. Durch dieses modulare und unternehmensunabhängige Konzept lassen sich unternehmensspezifische Lösungen ableiten, die durch entsprechende Prozesse implementiert eine durchgängige Rückverfolgbarkeit entlang der gesamten Lieferkette erzielen (Abramovici et al. 2008).

Die Zusammenfassung der aus den vorgestellten Anforderungen und Lösungsansätzen benötigten Aspekte, ergibt das in Tabelle 2-2 dargestellte Vorgehen für die Entwicklung eines Traceabilitykonzepts, das sich in sechs grundlegende Schritte nach Abramovici et al. (2007) gliedert.

**Tabelle 2-2** Vorgehen bei der Entwicklung eines Traceabilitymodells

<b>Definition und Abgrenzung der Projektziele</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Ziele sollen erreicht werden (Qualitäts-, Kunden-, Kostenziele...?)</li> <li>• Integration innerhalb der Supply Chain</li> <li>• Integration in Datenverarbeitungssysteme</li> <li>• Automatisierungsgrad</li> <li>• Involvierte (Unternehmen, Abteilungen, verantwortliche Kontaktpersonen)</li> <li>• Art der Traceability (upstream/downstream; interne/externe; Produkt-/Prozess-traceability etc.)</li> <li>• weitere Vorgaben (gesetzliche Anforderungen oder unternehmensinterne Vorgaben)</li> </ul>
<b>Anforderungsanalyse und -definition</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anforderungen an die Produktkennzeichnungstechnologie</li> <li>• Datenbezogene Anforderungen</li> <li>• Anforderungen an die Funktionalität eines Traceability-IT-Systems</li> <li>• Standards und Richtlinien</li> </ul>
<b>Definition der Traceability-Prozesse</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozesse und Verknüpfungen <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Welche Prozesse werden aufgenommen</li> <li>○ An welcher Stelle werden Daten erhoben</li> </ul> </li> </ul>
<b>Definition der Traceability-Daten und-Datenmodelle</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trace-Objekte definieren</li> <li>• Art der Objektkennzeichnung/Identifikationstechnik festlegen</li> <li>• Art, Umfang und Beziehung der zu erhebenden Daten festlegen</li> </ul>

- Produkt-, Prozess-, Logistik- und/oder Qualitätsdaten
- Welche Informationen müssen in welchen Phasen erhoben werden
- Datenformate und Codierungen (Einhaltung von Standards, Richtlinien)

---

#### **Auslegung, Auswahl, Anpassung, Einführung und Integration eines unterstützenden IT-Systems (Hardware und Software)**

---

- Art der Verwaltung der Daten
- verwendete Datenbank
- verwendete Hardware und Software
- Auswertefunktionen, Mechanismen für Verriegelungen etc.

---

#### **Umsetzung der Gesamtlösung**

---

### 2.2.4 Trace-Objekte

Bei den rückverfolgbaren Objekten (auch Trace-Objekte genannt), die mit einem Traceabilitysystem verfolgt werden, wird zwischen rückverfolgbaren Produkten und rückverfolgbaren Einheiten unterschieden. Bei rückverfolgbaren Produkten werden individuelle Produktionseinheiten, artikelbezogen, mit einer jeweils eindeutigen Identifikationsnummer verfolgt. Ein Produkt beschreibt dabei sowohl Werkstoffe, Bauteile, Baugruppen als auch Endprodukte. Rückverfolgbare Einheiten hingegen beschreiben mehrere Produkte, die unter bestimmten Gesichtspunkten zusammengefasst wurden. Das können entweder Chargen oder auch mehrere für den Transport gruppierte Versandeinheiten sein. Alle Elemente dieser Einheit werden dabei mit derselben Identifikationsnummer beispielsweise der Chargennummer verfolgt. Eine Charge, auch als Los oder Partie bezeichnet, beschreibt alle Einheiten eines Produktes, die unter einheitlichen Bedingungen gefertigt werden, also die gleichen Transformationsprozesse durchlaufen haben. Bei diskontinuierlichen Prozessen betrifft dies alle Produkte, die im gleichen Produktionsgang gefertigt werden und dementsprechend gleiche Merkmale bezüglich der Materialzusammensetzung oder der Qualität aufweisen. In der kontinuierlichen Produktion werden einheitliche Bedingungen durch die Herstellung auf einer Fertigungslinie, einheitliche Zulieferteile, eine homogene Qualität, gleichbleibende Prozessketten oder ein identisches Produktionsdatum bedingt, wobei auf eine Charge auch mehrere dieser Bedingungen zutreffen können (Weckenmann et al. 2014, S. 844; Böse und Uckelmann 2006, S. 133 f.).

Meistens ist das Trace-Objekt in einem Traceabilitysystem ein Fertigungslos, jedoch wird die Einheit zu Beginn der Einführung eines Systems vom jeweiligen Unternehmen bestimmt (Einbock und Kummer 2006, S. 198; Weckenmann et al. 2014, S. 841). Für die Wahl einer möglichst kleinen Charge oder eines einzelnen Produktes spricht, dass eine genauere Auskunft über die Elemente der Einheit möglich ist. Jedoch wird der Aufwand in der Informationsverarbeitung in diesem Fall auch immer größer, sodass

höhere Kosten erzeugt werden (Einbock und Kummer 2006, S. 198). Generell gilt, dass zur Ermöglichung der Rückverfolgbarkeit die rückverfolgbaren Objekte jeweils eindeutig gekennzeichnet werden müssen, damit deren Verlauf durch die Fabrik genauso wie auch deren Zusammensetzung stets ermittelt werden können (Kletti 2006, S. 190; Abramovici et al. 2007). Dies bedingt, dass die Verfolgung von jedem einzelnen Element nicht immer ausführbar ist, da manche Bearbeitungsverfahren oder die Art des Objekts die Kennzeichnung verhindern. Bei Wärmebehandlungen oder spanenden Verfahren ist diese Kennzeichnung genauso ausgeschlossen wie bei sehr kleinen Teilen oder etwa bei Flüssigkeiten. Liegt dieser Fall vor, so muss die Verfolgung auf der nächsten Stufe, also auf der der Transporteinheit erfolgen. Üblich ist in vielen Unternehmen die Rückverfolgung auf Basis von Paletten, da diese Transporteinheiten sich beispielsweise mit Hilfe des sogenannten SSCC-Code (Serial Shipping Container Code) eindeutig identifizieren lassen (Einbock und Kummer 2006, S. 198).

Herausforderungen an die Produkte und deren Kennzeichnung ergeben sich zudem aus Montageprozessen, da hier mehrere Komponenten zu einer neuen Einheit zusammengefügt werden, aber auch aus dem Transport der Objekte auf Ladungs- und Frachträgern. In der Montage ergibt sich eine Herausforderung aus der Vererbung der Daten und Eigenschaften ausgehend von den Rohkomponenten bzw. -stoffen über Baugruppen bis hin zum Endprodukt. Das Endprodukt muss dabei hierarchisch alle Daten der in sich inbegriffenen Komponenten enthalten. Die sich daraus ergebenden hohen Datenmengen müssen gespeichert und verwaltet werden (Weckenmann et al. 2014, S. 840; Böse und Uckelmann 2006, S. 141). Bei dem Zusammenfassen von mehreren Objekten auf einem Ladungs- oder Frachträger müssen diese mit dem Träger verknüpft werden, damit der Transport nachverfolgt werden kann ohne dass jedes Element einzeln betrachtet werden muss. Neben der generellen Aufteilung in Chargen und Produkte lassen sich die rückverfolgbaren Objekte daher weiter in Produktbestandteile, Ladungsträger und Frachträger klassifizieren (Abramovici et al. 2008).

Ein wichtiger Aspekt, der bei der Wahl des Trace-Objektes zu beachten ist, ist die „Intelligenz“ des Objekts. Um die Intelligenz eines Objektes zu erzielen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Eine davon ist ein miniaturisiertes eingebettetes System, das im Objekt integriert ist, alle Daten direkt abspeichert und in der Lage ist, mit der Umwelt zu kommunizieren. Diese Art der Datenhaltung ist dezentral und zeichnet sich dadurch aus, dass die Informationen über Produkte, deren Produktionsparameter oder notwendige Konfigurationen der Anlagen direkt verfügbar sind und somit direkt verarbeitet werden können. Alle durchlaufenen Schritte des Prozesses werden somit direkt am Produkt gespeichert. Dazu werden aktive Elemente, im Wesentlichen RFID-Systeme verwendet, die in der Lage sind, gelesen und auch modifiziert zu werden. Vorteilhaft an dieser Technik ist, dass bei Fehlern nicht das gesamte System blockiert wird (Liedl 2014, S. 429; Schlick et al. 2014, S. 60 f.).

Diese Form von Systemen ist jedoch wirtschaftlich gesehen nicht immer sinnvoll, da nicht zwangsläufig die Kosten durch die Funktionalität aufgewogen werden. Außerdem gibt es technische Gründe, die den Einsatz dezentraler Datenhaltung behindern, so können die Abmessungen des Teils oder aber auch die Art der Bearbeitung gegen den Einsatz sprechen (Schlick et al. 2014, S. 60 f.). Daher ist in vielen Fällen eine zentrale Datenhaltung angebracht. Bei ihr werden, nachdem das Objekt identifiziert wurde, die produkt- und prozessbezogenen Daten zentral mit Verweis auf das Objekt abgelegt, das eigentliche Objekt besitzt also keine „Intelligenz“. Für diese Art von Objekten werden lediglich passive Elemente zur Identifizierung wie Barcodes, QR-Codes oder auch RFID-Tags verwendet (Liedl 2014, S. 429).

### **2.2.5 Identifikationstechnik**

Eines der wichtigsten Elemente eines Traceabilitysystems ist die Identifikationstechnik, denn nur wenn Teile, Komponenten und Produkte eindeutig identifizierbar sind, ist die Rückverfolgbarkeit möglich (Fischer 2006, S. 180). Identifizieren wird dabei nach DIN 6763 als „das eindeutige und unverwechselbare Erkennen eines Gegenstandes anhand von Merkmalen (Identifizierungsmerkmalen) mit der für den jeweiligen Zweck festgelegten Genauigkeit“ definiert. Dabei sind die Merkmale die Eigenschaften, die zum Beschreiben und Unterscheiden der Gegenstände dienen und eine Identnummer (ID oder Identifizierungsnummer) ist die ihm zugehörige eindeutige Nummer. Sie dient als Zugriffsschlüssel auf alle relevanten Informationen, die das Objekt betreffen (Wegner-Hambloch und Springob 2004a, S. 61).

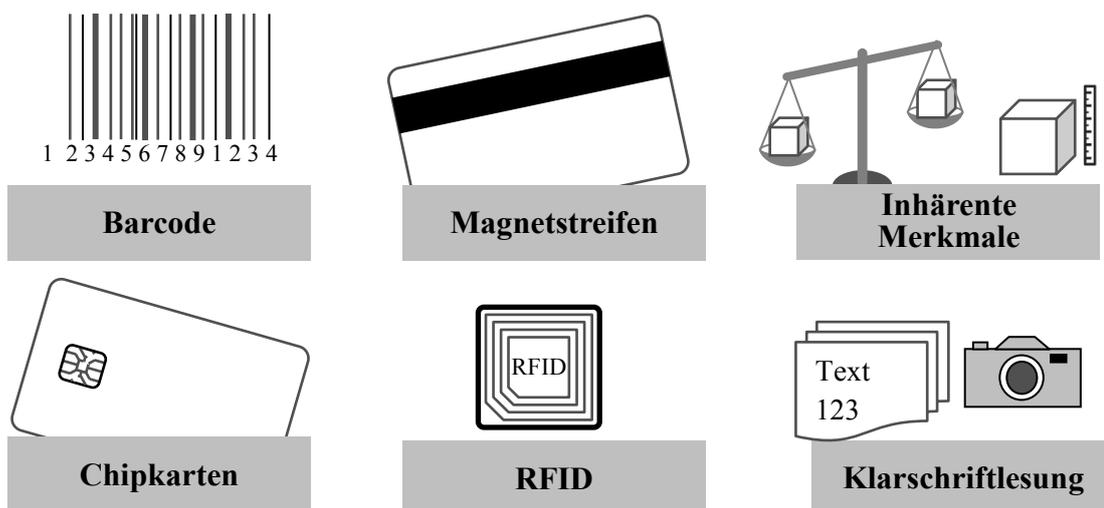
Bei der Wahl eines Nummernsystems muss abgewogen werden, in welchem Rahmen die Traceability umgesetzt werden soll. Bei einer unternehmensübergreifenden Rückverfolgung müssen die Identifikationssysteme standardisiert sein. Dazu eignen sich allgemeingültige und eindeutige Nummernsysteme. Die gängigsten Identifikationsstandards sind die Internationale Lokationsnummer (ILN), die Europäische Artikelnummer (EAN) und die Nummer der Versandeinheit (NVE), mit denen eine weltweite Überschneidungsfreiheit gewährleistet wird (Gleissner und Femerling 2008, S. 207 f.; Wegner-Hambloch und van Betteray 2004, S. 45; ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 88 f.).

Die Nummer der Versandeinheit (auch SSCC: Serial Shipping Container Code) dient zur Identifikation von Versandeinheiten, wie Paletten oder Containern. Zur eindeutigen Identifikation von Unternehmen und Unternehmensteilen wie etwa dem Wareneingang oder Kühlregalplätzen hingegen wird die ILN verwendet. Sie wird zentral im jeweiligen Land vergeben und ist ein Bestandteil der EAN, welche das spezielle Objekt mit seinen Merkmalen wie der Farbe, der Größe oder der Verpackungseinheit identifiziert. Die EAN besteht aus einer Basisnummer, die aus den ersten sieben Ziffern der ILN besteht, einer Artikelnummer, die individuell vom Unternehmen vergeben werden kann, sowie

einer Prüfziffer (Gleissner und Femerling 2008, S. 207; ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 73).

Abhängig vom Automatisierungsgrad (vergleiche Abschnitt 2.2.3) unterscheidet sich die Wahl der Identifizierungstechnik. Prinzipiell wäre ein manuelles Identifizieren der Trace-Objekte mit Hilfe von einfachen Listen möglich, jedoch ist die maschinelle, automatische Erfassung deutlich exakter, fehlerfreier und schneller (Wegner-Hambloch und Springob 2004a, S. 63; Wegner-Hambloch und van Betteray 2004, S. 45). Automatische Identifikationssysteme (Auto-ID) sind zielführend, da sie eine sichere Identifikation ermöglichen und damit sowohl die Basis für eine effiziente Steuerung im Produktions- und Materialfluss als auch eine zielgerichtete Informationsbereitstellung erlauben. Auto-ID-Systeme im Materialfluss sind nicht nur für die Identifikation der Teile zuständig, sondern erfassen die entsprechenden Daten und übertragen sie an die Steuerungssysteme (Liedl 2014, S. 429). In der einfachsten Form besteht ein Identifikationssystem aus einem Datenträger, einer Leseinheit und einer Auswerteeinheit (Franke und Dangelmaier 2006, S. 71).

Produkte werden mit Hilfe einer Identtechnik gekennzeichnet, bei langlebigen Gütern besteht dabei die Herausforderung, dass die Identifizierung auch nach langer Zeit und oftmals aggressiven Einwirkungen oder Verschleiß Bestand haben muss (Fischer 2006, S. 180). Zur Erfassung der Objekte gibt es eine Vielzahl an technischen Varianten, die sich in ihrer Komplexität und ihrem Umfang unterscheiden, typischerweise können die in Abbildung 2-8 dargestellten genannt werden (Kern 2007; Liedl 2014, S. 429; Wendel und Seewig 2013).



**Abbildung 2-8** Typische Identifizierungstechniken

Eine einfache Methode zur Identifizierung ist die Messung des Gewichts oder des Volumens eines Objektes (Gleissner und Femerling 2008, S. 209), also über die objektigenen, inhärenten Merkmale. Eine weitaus komplexere Form der Identifizierung über solche inhärente Merkmale ist die über die einzigartige Elementzusammensetzung bei-

spielsweise in metallischen Bauteilen. Bei Metallen können außerdem optische Verfahren, die die stochastische Oberflächenrauheit als Identifizierungsmerkmal benutzen, verwendet werden (Wendel und Seewig 2013). Die inhärenten Verfahren beziehen sich jedoch meist auf ein spezielles Produktspektrum, wie etwa metallische Bauteile und sind daher nicht auf alle Objekte in der Fertigung anwendbar. Daher eignen sich Identifizierungsmethoden mit an den Objekten angebrachten Informationsträgern meist besser.

Eine optische Methode mit dementsprechenden Informationsträgern ist die Klarschriftlesung (Optical Character Recognition), bei der ein Lesegerät die Etiketten mit Ziffern oder Buchstaben an den Objekten direkt abliest. Sie bietet jedoch ein geringes Speichervolumen verglichen mit anderen nicht-optischen Systemen wie Chipkarten- und Magnetstreifensystemen. Die Nutzung von Magnetstreifen hingegen ist, obwohl sie eine etablierte Technologie ist, sehr unsicher in der Funktionssicherheit, da die Gefahr der Entmagnetisierung besteht, daher ist sie auch weniger gut geeignet für Traceabilitysysteme (Weckenmann et al. 2014, S. 849). Genauso wie bei den Magnetstreifen idealerweise ein direkter Kontakt zwischen Lesegerät und dem Informationsträger bestehen sollte, muss auch bei Chipkarten ein direkter metallischer Kontakt bestehen. Nachteilig ist außerdem, dass lediglich Datensätze abgerufen werden können und die Abwicklung von komplexeren Vorgängen, wie etwa einem Zugriffsschutz, nicht umsetzbar ist. Insgesamt sind Klarschriftlesung, Magnetstreifen und Chipkarten im Materialfluss und der Materialbereitstellung daher nur sehr bedingt im Einsatz (Liedl 2014, S. 429). Die beiden wichtigsten Identifizierungstechniken sind die Barcode-Technologie, die die am weitesten verbreitete und bekannteste Auto-Identifikationstechnologie ist, und die RFID-Technologie, welche äußerst zukunftssträftig ist und eine zunehmende Bedeutung im Materialfluss und der Logistik hat (Liedl 2014, S. 429).

Der Barcode ist genau wie die Klarschriftlesung ein optisches Verfahren, hat jedoch im Gegensatz zu diesen eine deutlich höhere Erkennungszuverlässigkeit. Dies liegt daran, dass anstatt des Auslesens von Ziffern oder Buchstaben durch grafische Elemente dargestellte Binärcodes mit Hilfe eines Lesegeräts ausgelesen werden. Diese Codes sind nicht vom Menschen lesbar und können mit einem an das Lesegerät angeschlossenen IT-System verarbeitet werden. Die Codes können in ein-, zwei- und dreidimensional unterschieden werden. Die eindimensionalen sind dabei die klassischen Codes aus einer Reihe von unterschiedlich breiten Balken, sie besitzen am wenigsten Speicherplatz. Bei den zweidimensionalen Codes wird zwischen Matrix und Stapelcodes unterschieden, wobei die Stapelcodes aus mehreren eindimensionalen Codes, die übereinander liegen bestehen. Bei Matrixcodes hingegen wird ein Feld mit leeren oder geschwärzten Flächen versehen, sodass ein matrixförmiges Punktraster entsteht. Der Matrixcode wird wegen seines besseren Verhältnisses von Dateninhalt zu Platzbedarf in der technischen Industrie bevorzugt (Schönle 2011). Wird ein Matrixcode um unterschiedliche farbige

Felder ergänzt, so vergrößert sich der Speicherplatz weiter. Diese Art von Code nennt sich dreidimensional. Er ist noch am Anfang seiner Entwicklung und stellt erhöhte Anforderungen an das Lesegerät, da dieses in der Lage sein muss, Farben zu unterscheiden. Insgesamt gibt es zwei verschiedene Arten von Barcode-Lesegeräten, die unterschiedliche Vorteile besitzen. Lasersysteme sind die preisgünstigere Variante, können allerdings nur eindimensionale Codes lesen. Kamerasysteme hingegen bieten den Vorteil, dass sie auch zwei- und dreidimensionale Codes lesen können und außerdem leserichtungsunabhängig sind (Kern 2007, S. 17; Weckenmann et al. 2014, S. 843 f.). Oft wird der Inhalt eines Barcodes durch den zuvor erwähnten EAN-Identstandard mit 13 Ziffern beschrieben. Diese Form, die EAN 13, ist die bekannteste Variante des EAN-Systems und wird für eindimensionale Barcodes genutzt (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 74). Wenn zusätzliche Informationen wie die Chargennummer oder eindeutige Seriennummern mit dem Code vermerkt werden sollen, müssen gestapelte Codes oder Matrixcodes verwendet werden (Böse und Uckelmann 2006, S. 137–141). Ein wesentlicher Schwachpunkt der Technik ist der relativ geringe Dateninhalt, dafür lassen sich die Codes leicht und flexibel herstellen und können direkt in der Produktion ausgedruckt werden (Böse und Uckelmann 2006, S. 137 ff.; Kletti 2006, S. 132). Zudem gibt es Versuche, bei denen ein Matrixcode direkt in ein Material, zum Beispiel Reifen (Baumann 2015) oder Gussteile (Gottsauer 2008) eingeprägt wird und somit permanent mit dem Objekt verknüpft ist. Die Vor- und Nachteile der Barcodetechnik sind in Tabelle 2-3 zusammengefasst.

**Tabelle 2-3** Vor- und Nachteile von Barcodes in Anlehnung an Gleissner und Femerling (2008, S. 213) und Kern (2007, S. 17)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>geringe Kosten pro Einheit/Etikett</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Empfindlichkeit gegen Schmutz, Feuchtigkeit, mechanische Einwirkungen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>standardisierte Leseinheiten im Einsatz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lesbarkeit nur bei Sichtkontakt</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>in der Logistik weit verbreiteter Standard</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>begrenzt Datenvolumen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>sicher in der Funktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>keine Datenergänzung im Prozess möglich</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>einfach applizierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Neigungswinkel darf nicht zu groß sein</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>meist ausreichende Datenmenge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>leicht kopierbar</li> </ul>

Neben den Barcodes sind RFID-Systeme die wichtigsten Auto-ID-Verfahren im industriellen und kommerziellen Sektor (Weckenmann et al. 2014, S. 851). Diese Technologie erfährt zunehmende Bedeutung im Bereich Materialfluss und Logistik (Liedl 2014, S.

429), weil sie eine deutlich höhere Leistungsfähigkeit und ein breiteres Einsatzfeld als Barcodes hat (Kern 2007, S. 12; Gleissner und Femerling 2008, S. 214). RFID-Systeme bieten eine eindeutige, schnelle, berührungslose Identifikation von einem oder mehreren Objekten gleichzeitig und benötigen dabei keine direkte Sichtverbindung (Günthner und Wölfle 2011, S. 8). Die Grundlage der Technik ist die Übermittlung von Daten über ein elektromagnetisches Feld zwischen einem RFID-Transponder (auch Tag, Label oder Smart Label) und einer Schreib- bzw. Lesestelle. Bei passiven Transpondern wird die benötigte Energie durch die Lesestelle zusammen mit dem eigentlichen Signal übermittelt und durch eine Spule vom Transponder aufgenommen. Transponder, die eine Energiequelle besitzen, werden als aktiv bezeichnet. Sie haben den Vorteil, dass sie mehr Speicherkapazität und eine größere Reichweite besitzen. Die Transponder können abhängig von ihrem Funktionsumfang lediglich auf die Anfragesignale der Lesestelle antworten oder aber auch von der Schreibstelle beschrieben/verändert werden. Somit eignen sie sich, wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, sowohl für die dezentrale als auch die zentrale Datenhaltung. Die durch die Schreib- bzw. Lesestelle gewonnenen Daten werden mit Hilfe eines IT Systems verarbeitet. Die Reichweite des Systems ist abhängig von der Wahl der Frequenz des elektromagnetischen Feldes und der Energiequelle und kann zwischen einigen Zentimetern und mehreren hundert Metern liegen (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 246 f.; Weckenmann et al. 2014, S. 851 f.).

Für die Inhalte eines RFID-Transponders wurde der Electronic Product Code (EPC) entwickelt, für den der EAN-Code Pate gestanden hat und mit dem er kompatibel ist. Er besteht aus wenigen Ziffern und hat daher einen geringen Speicherbedarf. Unterschiedliche Klassen des EPC legen fest, inwiefern der RFID-Transponder beschreibbar ist und ob er aktiv oder passiv ist (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 81 f.; Kern 2007, S. 17).

Durch den Einsatz von RFID-Systemen bieten sich neue Ansätze in den Logistik- und Produktionsprozessen. Beispielsweise kann der Einsatz von RFID in Form eines Lesegeräts im Handschuh eine automatische Überprüfung des Pickprozesses im Kommissioniervorgang ermöglichen. Zusammen mit Lagerfächern oder Behältern, die mit RFID-Transpondern versehen sind, kann die richtige Entnahme oder Ablage eines Objektes durch eine Bluetooth-Verbindung und eingebettete, vernetzte Systeme überprüft werden. Optische und/oder akustische Signale verhindern so Fehler im Vorgang (Günthner et al. 2014, S. 314 f.). Trotz der vielen Vorteile, die RFID-Systeme bieten, kann der Einsatz von weniger komplexen Identifikationstechniken, wie etwa Barcodesystemen, sinnvoll sein. Oftmals genügen diese Systeme, da sie in ihrem Funktionsumfang ausreichend und dabei deutlich preiswerter sind (Kern 2007, S. 12). Abhängig von der Aufgabenstellung müssen daher die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Identifikationstechniken abgewogen werden. Tabelle 2-4 enthält dazu die Vor- und Nachteile von RFID-Systemen.

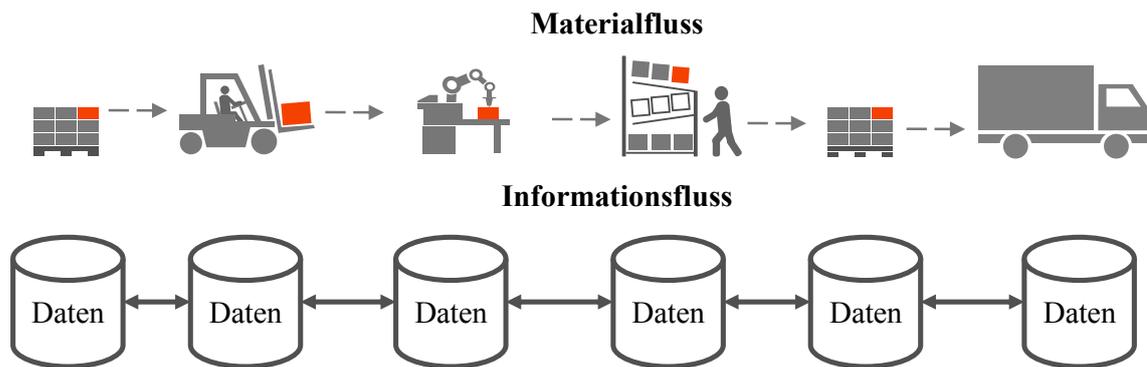
**Tabelle 2-4** Vor- und Nachteile von RFID in Anlehnung an Gleissner und Femerling (2008, S. 215), Franke und Dangelmaier (2006, S. 72) und Böse und Uckelmann (2006, S. 138)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>geringer Platzbedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>hohe Kosten für Integration und Hardware (Transponder, Lesegeräte)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lesbarkeit ohne direkte Sichtverbindung und über weitere Distanzen zum Transponder (Label oder Tag), keine Ausrichtung zum Lesegerät nötig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Probleme mit Metall, Flüssigkeiten; Störung durch Funk möglich</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Wiederverwendbarkeit: Daten abänderbar, keine physische Abnutzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ungenügende Sicherheit, Daten manipulierbar</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>hohes Datenvolumen speicherbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Datenschutz ist noch in der Entwicklungsphase</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>relative Schmutzunempfindlichkeit; hitze- und kältebeständig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gefahr des Datenverlustes bei exklusiv externer Speicherung auf dem Transponder</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Witterungseinflüsse wie Regen, Kondensat oder Schnee auf den Transpondern beeinträchtigen nicht den Schreib-/Lesevorgang.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>komplexe Technologie; Verarbeitung hoher Datenvolumina in den nachgeordneten Applikationen notwendig</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>geringe Fehlerrate und größere Lesegenauigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ungenügende Standardisierungen (Datenschnittstelle und einheitliche Frequenz)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>eindeutige Identifizierung (EPC)</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>sofortige Identifizierung der Objekte</li> </ul>	

### 2.2.6 Datenverarbeitung im Rahmen der Traceability

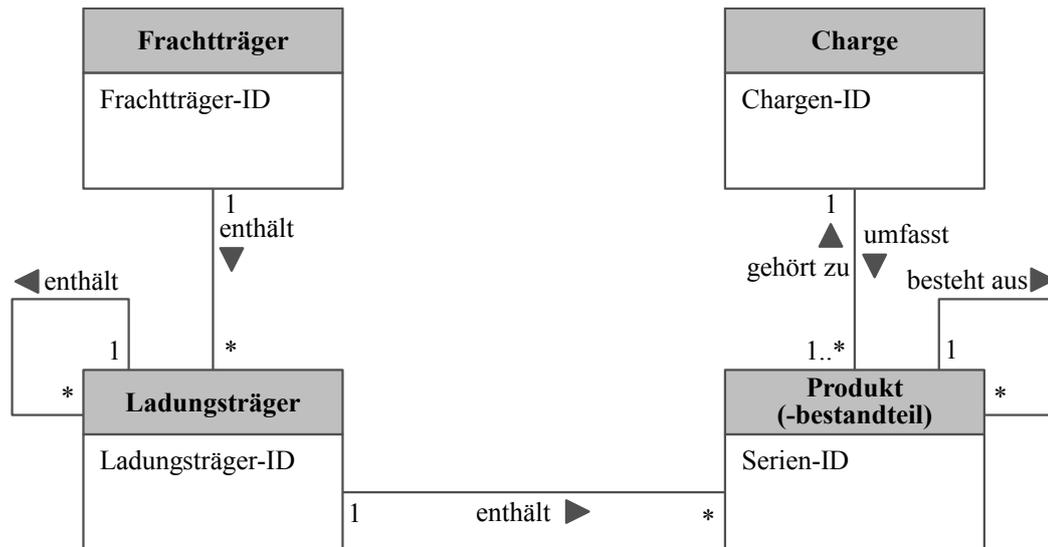
Die Daten, die mit Hilfe der Identifikationssysteme erhoben werden, müssen aufgenommen und verarbeitet werden. Denn nur durch eine flexible Erfassung und die anschließende Verwaltung und Auswertung der Daten kann den wachsenden Ansprüchen, die durch die Komplexität und Qualitätsansprüche der Produkte hervorgerufen werden, genüge getan werden (Neugebauer et al. 2008). Bei richtiger Verwendung können die Daten zur Prozessoptimierung und Prozessabsicherung genutzt werden, indem zuvor unbekannte Zusammenhänge aufgedeckt werden (Weckenmann et al. 2014, S. 843). Außerdem können den Mitarbeitern zur sinnvollen Unterstützung zustandsabhängige Informationen bereitgestellt werden (Bilek et al. 2012). Um diese Vorteile zu erzielen, muss jedoch eine große Datenmenge über einen langen Zeitraum verwaltet werden. Abhängig von der Technologie oder auch der Wertigkeit des Traceabilitysystems müssen über eine Zeitspanne von bis zu zehn Jahren die Prozessdaten von fünf bis zu etwa 100 Datenpunkten pro verfolgtem Objekt gespeichert werden und verfügbar sein (Krainz 2013).

Allgemein gibt es zwei verschiedene Arten von Datenverknüpfungen, die durch ein Traceabilitysystem abgedeckt werden müssen. Die erste Art ist die Verknüpfung des physischen Warenstroms mit dem Informationsfluss, wie in Abbildung 2-9 dargestellt. Sie ermöglicht dem Unternehmen den Ort der Ware oder auch die Bearbeitung nachzuhalten (Wegner-Hambloch und Springob 2004a, S. 65 f.). Die Daten werden dazu wie in Abschnitt 2.2.4 bereits beschrieben dezentral im jeweiligen Objekt oder in einem zentralen System aufgenommen.



**Abbildung 2-9** Verknüpfung des Warenstroms mit dem Informationsfluss in Anlehnung an Wegner-Hambloch und Springob (2004a, S. 67)

Zweitens muss erfasst werden, wie die physischen Objekte miteinander verknüpft sind. Dazu gehören, wie bereits in Abschnitt 2.2.4 dargestellt, die Verbindung von rückverfolgbaren Einheiten mit einem Ladungsträger oder die Zugehörigkeit zu einer Charge. Ziel dabei ist darzustellen, wie die Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Verpackungshierarchien und Einheiten aussehen (Wegner-Hambloch und Springob 2004a, S. 65). Eine Möglichkeit, die verschiedenen Objekte (Frachttäger, Charge, Produkt, Produktbestandteile und Ladungsträger), die bereits in Abschnitt 2.2.4 vorgestellt wurden, mit ihren Abhängigkeiten und Beziehungen abzubilden, ist die in Abbildung 2-10 dargestellte. Um die einzelnen Elemente zu identifizieren und ihre Beziehungen untereinander abzubilden, besitzt jedes der fünf Objekte eine eigene Identifizierungsnummer (ID). Damit die Verfolgung von zusammengesetzten oder getrennten Objekten dargestellt werden kann wird zusätzlich eine sogenannte Master ID genutzt. Diese ist mit den untergeordneten IDs verknüpft, sodass sich alle Objekte in einem Ladungsträger über dessen Master ID verfolgen lassen. Beim Transport können die einzelnen Objekte dann unkompliziert gemeinsam über die IDs des Frachttägers getrackt werden (Abramovici et al. 2008).



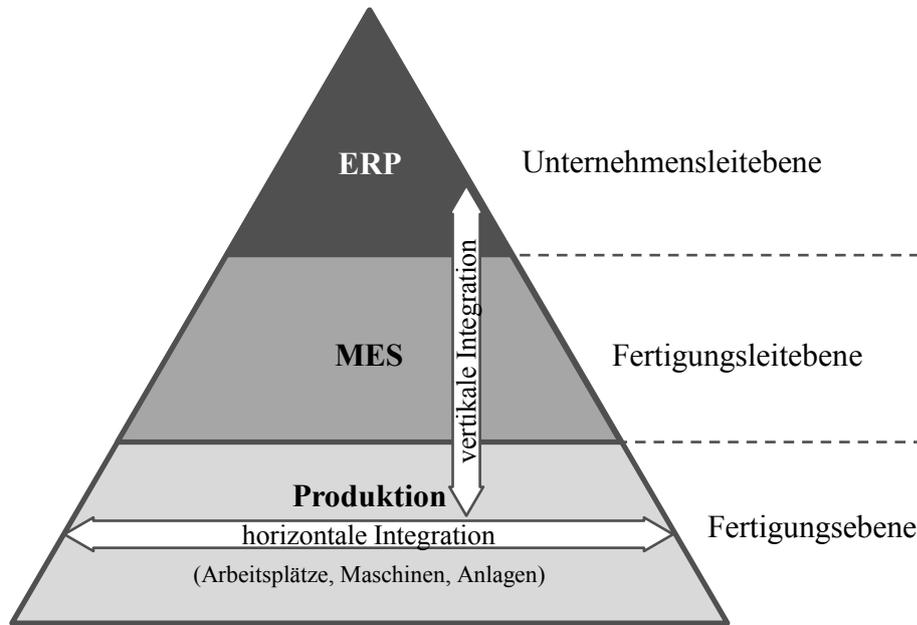
**Abbildung 2-10** Beziehung unterschiedlicher Trace-Objekte nach Abramovici et al. (2008)

Die bloße Aufnahme solcher Daten ist jedoch nicht ausreichend um Vorteile zu generieren, sondern das volle Potenzial der gewonnenen Produktdaten muss ausgenutzt werden. Um dieses zu ermöglichen bedarf es passender IT-Systeme, wie dem Manufacturing Execution System (MES). Ein MES ist ein Fertigungsmanagementsystem (VDI 5600 Blatt 1 (Entwurf)) und verbindet die gesamten Aspekte der Wertschöpfungskette, indem es nahezu alle Abteilungen mit unternehmensrelevanten Daten in Echtzeit beliefert (Kirsch 2015). Dabei werden diese nicht nur weggeschrieben, sondern angemessen weiter verwendet (Podgurski 2013).

Um dies zu gewährleisten, besteht ein MES in der Regel aus den drei Funktionsbereichen Qualität, Personal und Fertigung. Zum Bereich Fertigung gehören zum Beispiel die Betriebsdatenerfassung (BDE), also auftrags- und personenbezogene Zeiten und Mengen oder das Ressourcenmanagement mit dem technischen Zustand der Betriebsmittel, aktuellen Verfügbarkeiten oder auch den Kompatibilitäten zu Maschinen. Im Funktionsbereich Qualität können zum Beispiel die Objekte im Warenein- und -ausgang verfolgt oder im Reklamationsmanagement die reklamierten Objekte zurückverfolgt werden. Der Aspekt Personal beinhaltet unter anderem die Personalzeiterfassung oder auch die Zutrittskontrolle, zum Beispiel zur Bedienung von bestimmten Maschinen (Kletti 2006, S. 31 ff.).

Ein MES wird auch Produktionsleitsystem genannt und sorgt für die informationstechnische Einbindung der Produktion in die Gesamtheit eines Unternehmens (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 191). Dazu ist es, wie in Abbildung 2-11 dargestellt, auf der einen Seite mit dem Enterprise Resource Planning System (ERP System) und auf der anderen Seite mit der Produktion, also den Maschinen und weiteren Systemen in dieser Ebene, verbunden. Das ERP System plant und koordiniert die unternehmerischen und

betriebswirtschaftlichen Aufgaben und sorgt für einen möglichst effizienten Einsatz der Ressourcen (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 85 f.). Das ERP System gibt zeitnah Informationen über das MES in die Produktion weiter und erhält dann Kennzahlen, Daten und korrekt aufbereitete Informationen aus der Produktion vom MES zurück. Die drei Ebenen, ERP, MES und Produktion können auch als Unternehmensmanagement, Fertigungsleitebene und Fertigungsebene bezeichnet werden.



**Abbildung 2-11** Einordnung des MES in die Leitebenen eines Unternehmens in Anlehnung an VDI 5600 Blatt 1 (Entwurf) und Kletti 2006 (2006, S. 39 f.)

Das MES ermöglicht einerseits eine durchgängige vertikale Integration zwischen dem Unternehmensmanagement und der Fertigungsebene und stellt somit sicher, dass die Ebenen zeit- und bedarfsgerecht über Informationen aus anderen Ebenen versorgt werden. Andererseits wird eine horizontale Integration, also ein effektives Arbeiten mit den drei Funktionsgruppen (Qualität, Personal und Fertigung) gewährleistet. Da diese drei nicht unabhängig voneinander sind, sondern sich gegenseitig beeinflussen, müssen sie eng gekoppelt werden und auf einem einzigen Datenbestand aufsetzen können (Kletti 2006, S. 36 ff.). Somit ermöglicht ein MES, die durch Industrie 4.0 Konzepte geforderte horizontale und vertikale Integration (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Die Vision einer smarten Fabrik fordert zudem eine dezentrale hardwaregestützte Systemstruktur (Bilek et al. 2012). Dies steht im Gegensatz zu einem zentralen Ansatz, wie er in einem MES vorhanden ist. Trotzdem existieren Gründe, die für den Ansatz des MES sprechen. Erst durch eine zentrale Datenbank ergibt sich ein Echtzeit-Gesamtbild aus den vielen Daten der Sensoren. Auf die Daten kann schnell zugegriffen werden, da nicht mehrere Datenquellen angefragt werden müssen und die Daten schnell verarbeitet werden können. So entsteht eine gute Grundlage für Entscheidungen und Optimierungen der Fertigungsprozesse (Kletti 2013). Die Effizienz einer MES-Lösung zeigt sich

jedoch nur dann, wenn die gewonnenen Daten im Produktionsablauf aktiv genutzt werden und sinnvoll mit anderen Systemen und Arbeitsabläufen einsetzbar sind. Dies ist nicht bei allen MES der Fall, da sich die Systeme stark unterscheiden, nur schwer zu vergleichen sind und keine allgemeingültige Definition über den Umfang der funktionalen und aufgabenorientierten Bestandteile existiert (Podgurski 2013; Kirsch 2015; VDI 5600 Blatt 1 (Entwurf); Kletti 2006).

Obwohl ein MES häufig überwiegend als Lieferant für Kennzahlen gerade aus vielen Bereichen der Fertigung wahrgenommen wird, bietet es weitere Möglichkeiten der Nutzung. Neben der Betrachtung der aktuellen Situation und der Vergangenheit kann sowohl die nahe als auch die ferne Zukunft der Fabrik prognostiziert werden. Für diese Prognose dienen die aufgenommenen Kennzahlen, da mit Hilfe von Schwachstellenanalysen Optimierungen von Fertigungsabläufen oder auch Arbeitsplänen erfolgen können.

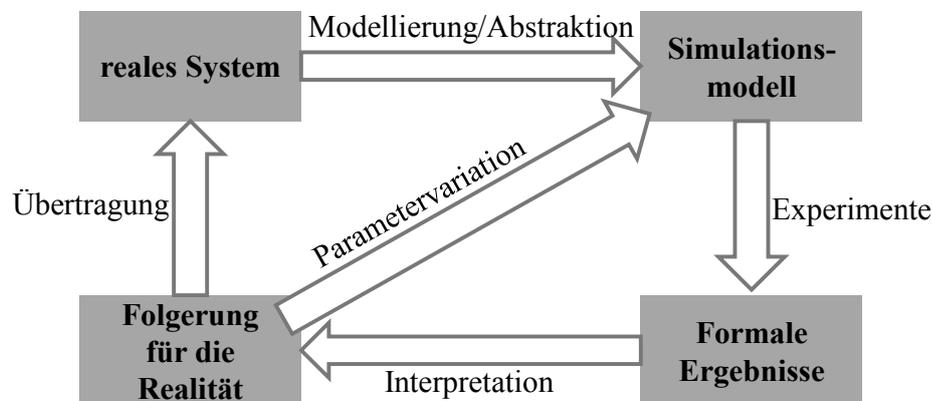
Mit Hilfe einer Simulation können, aufbauend auf den gewonnenen Daten und Kennzahlen, neue Anlagen realitätsgenau dargestellt werden. Bei der Betrachtung der nahen Zukunft wird das Finden von richtigen Entscheidungen in der Produktion unterstützt. Dafür ist es essentiell, dass das System in Echtzeit operiert, denn nur so können, aufbauend auf dem aktuellen Zustand in der Fabrik, neue Alternativen für die nahe Zukunft entwickelt werden. Eine permanente Neubewertung der aktuellen Fertigungssituation wird ermöglicht und somit statt einer starren Planung Regelkreise geschaffen. Um Alternativszenarien im Vorfeld zu betrachten, das beste Szenario auszuwählen und so kurzfristig eine Neuplanung zu ermöglichen, wird die Simulation verwendet (VDI 5600 Blatt 5).

## 2.3 Ereignisdiskrete Simulation im Produktionsbetrieb

### 2.3.1 Klassifizierung und Anwendungsfelder

Simulation wird im Bereich der Logistik-, Materialfluss- und Produktionssysteme durch die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 definiert als „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“ Die Leistungsfähigkeit, Kapazität oder auch wirtschaftliche Aspekte eines realen Systems können durch diese virtuelle Nachbildung untersucht werden, indem dessen Reaktionen auf die Realität übertragen werden (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 284).

Insgesamt sind die Methoden zur Untersuchung eines Systems vielfältig und unterscheiden sich grundlegend dadurch, ob Experimente an einem realen System oder einem Modell durchgeführt werden. Bei der Simulation wird statt eines physischen Modells ein mathematisches Modell verwendet und wenn mathematisch-analytische Untersuchungen an diesem Modell an ihre Grenzen stoßen, ist die Simulation gefragt. Vor allem wenn das System sehr komplex ist, da es eine Vielzahl von zeit- und zufallsabhängigen Systemgrößen und vielfältige Wirkzusammenhänge besitzt, kann mit Hilfe der Simulation das System untersucht und beurteilt werden (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1).



**Abbildung 2-12** Vorgehen bei der Simulation nach Hrdliczka (1997)

Bei der Simulation wird, wie in Abbildung 2-12 dargestellt, aus dem realen System durch Abstraktion und Reduktion ein Simulationsmodell gewonnen. Dieses Modell wird mit Parametervariationen ausgeführt, welche zu formalen Ergebnissen führen. Diese werden interpretiert, so dass Folgerungen für das reale System gezogen werden. Weitere Parametervariationen bzw. Experimente, die unter Einbeziehung der vorhergehenden Erkenntnisse gemacht werden, liefern weitere Ergebnisse, die wiederum interpretiert werden müssen. Bei der Übertragung der Erkenntnisse auf das reale System ist zu beachten, dass nicht alle Erkenntnisse übertragbar sind, da das Simulationsmodell lediglich durch Abstraktion und Reduktion gewonnen wurde und somit nicht alle Aspekte

und Verhaltensweisen wiedergeben kann (Hrdliczka 1997; Haasis 2008, S. 67; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1).

Abhängig von der Art und Weise wie das Zeitverhalten innerhalb des Modells (also der Simulationszeit) voranschreitet, können unterschiedliche Modellierungsmethoden unterschieden werden. Grundsätzlich wird zwischen dem diskreten und dem kontinuierlichen Ansatz unterschieden (Kuhn und Wenzel 2008). Bei der kontinuierlichen Simulation ändert sich der Modellzustand stetig mit der Zeit, wohingegen bei der diskreten Simulation nur zu bestimmten Zeitpunkten eine Änderung des Zustands erfolgt (VDI-Richtlinie 3633). Die Zeitpunkte der Änderung können dabei einerseits ereignisorientiert, also durch die Ereignisse selbst festgelegt werden oder aber zeitorientiert, also nach festgelegten Zeitintervallen erfolgen. Werden die Zeitintervalle bei der zeitorientierten diskreten Simulation sehr klein gewählt, wird von quasi-kontinuierlicher Simulation gesprochen.

Weitere Klassifizierungsmöglichkeiten von Simulationsmethoden sind die Differenzierung von statischen und dynamischen Simulationen sowie die Unterscheidung zwischen stochastischen und deterministischen Simulationen. Im Gegensatz zu den dynamischen Simulationen, bei denen ein Zeitverhalten zugrunde liegt, wird bei statischen Simulationen, wie der Monte-Carlo-Simulation, unabhängig von der Zeit ein Zustandsverhalten berechnet (Fischer 2014, S. 602 f.). Je nachdem, ob das System ein Zufallsverhalten beinhaltet oder nicht, können Simulationsmodelle stochastisch oder deterministisch sein (Kuhn und Wenzel 2008). Wenn Lösungen zu Problemen gesucht werden, bei denen Zufallseinflüsse auftreten und diese sich durch einen oder mehrere stochastische Prozesse modellieren lassen, werden stochastische Simulationen verwendet. Bei diesen wird in den meisten Fällen das zeitliche Ablaufen des Systems untersucht und gesteuert (Neumann und Morlock 1993, S. 698). Aber auch wenn bei der Modellierung nicht alle Daten verfügbar sind, weil die Erhebung nicht möglich, zu zeitintensiv oder zu kostspielig ist, wird die Stochastik angewendet (Eley 2012, S. 18).

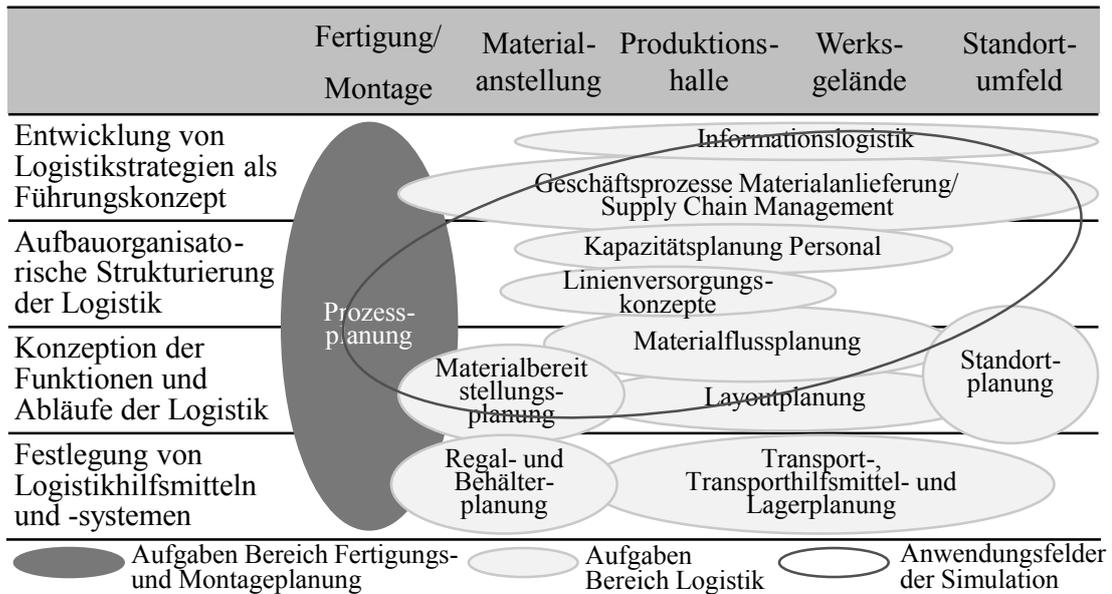
Bei der Simulation von Anlagen oder Abläufen in der Produktion und Logistik wird meist das dynamische Verhalten des Systems durch die Verwendung von stochastischen Komponenten und Zustandsänderungen an diskreten Zeitpunkten dargestellt (Rose und März 2011). Folglich wird also fast ausschließlich die ereignisdiskrete Simulation (engl. Discrete Event Simulation (DES)) verwendet, wohingegen die zeitgesteuerten und kontinuierlichen Simulationen in diesem Bereich eine geringere Relevanz besitzen (Kuhn und Wenzel 2008, S. 79).

Neben dem Begriff der ereignisdiskreten Simulation werden für solche Simulationen im deutschsprachigen Bereich auch häufig die Begriffe Ablauf- oder Materialflusssimulation verwendet, wobei diese fälschlicherweise auf die Betrachtung des Materialflusses eingrenzen (Bracht et al. 2011, S. 122). Wie bereits in Abschnitt 2.1.3 dargestellt ist die

Ablaufsimulation bzw. DES ein wesentlicher Baustein im Konzept der Digitalen Fabrik (Eley 2012, S. 12).

Allgemein wird die Simulation immer dann verwendet, wenn das reale System eine hohe Komplexität besitzt, die mit analytischen Methoden nicht mehr bewältigt werden kann, oder eine Untersuchung des Systemverhaltens über einen längeren Zeitraum erfolgen soll. Außerdem können zukünftige Szenarien mit ihrer Hilfe prognostiziert und analysiert werden (Kuhn und Wenzel 2008, S. 74). Im Bereich der Logistik-, Materialfluss- und Produktionssysteme ist die Simulation ein anerkanntes Hilfsmittel bei der Planung, Realisierung und dem Fabrikbetrieb. Obwohl der Schwerpunkt des Einsatzes von Simulation ursprünglich auf der Planungsabsicherung lag, wird sie zunehmend auch in allen weiteren Phasen der Planung und des Realisierungsprozesses, wie etwa im Fabrikbetrieb, verwendet (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1). Die Anwendungsbereiche der Ablaufsimulation bzw. DES liegen neben den innerbetrieblichen Logistikabläufen wie den bereits erwähnten Simulationen im Materialfluss auch in unternehmensübergreifenden Logistiknetzen. So können beispielsweise der unternehmensübergreifende Verkehr oder auch die logistischen Material- und Informationsflüsse mit ihr betrachtet werden. Im innerbetrieblichen Bereich wird mit ihr sowohl die Produktionslogistik als auch die Beschaffungs- und Distributionslogistik abgebildet (Bracht et al. 2011, S. 123). Erweitert kann die Simulation auch den operativen Bereich, also die kurzfristige Überprüfung von Handlungsempfehlungen, mit einbeziehen. Dazu müssen allerdings reale Anlagen und Systemkomponenten sowie deren Planungs- und Steuerungssysteme, wie etwa ERP, MES oder PPS mit Hilfe einer Online-Schnittstelle mit in das Modell integriert werden (Kuhn und Wenzel 2008, S. 85).

Um Mitarbeiter in ihren oft komplexen Entscheidungssituationen zu unterstützen, ist eine echtzeitfähige Simulation zielführend. Bei dieser wird auf Echtzeitinformationen aus der Produktion zurückgegriffen und daraus ein Simulationsmodell erstellt, welches die realen Gegebenheiten hinreichend genau einbezieht und so zum Beispiel in der Lage ist, die Auswirkungen von Störungen darzustellen und entsprechende Gegenmaßnahmen und deren Folgen zu prognostizieren (Schuh et al. 2014, S. 285). Durch eine geeignete Visualisierung können diese komplexen Sachverhalte transparent dargestellt und untersucht werden (Fischer 2006, S. 185), dazu eignen sich interaktive Hilfsmittel, wie etwa Web Tools, die bei der Bewältigung des komplexen Lösungsraums unterstützen und schließlich zu einer guten Entscheidung führen (Schuh et al. 2014, S. 286).



**Abbildung 2-13** Planungsfelder am Beispiel der Simulation der Versorgungsprozesse einer Montagelinie nach März und Weigert (2011, S. 8)

Zur Verdeutlichung, in welcher vielfältigen Form die Simulation Einsatz finden kann, sind in Abbildung 2-13 exemplarisch für die Versorgungsprozesse einer Montagelinie die Bereiche, in denen die Simulation anwendbar ist, hervorgehoben. Im Bereich der Fabrikplanung, also der Layout-, Materialfluss- oder auch der Materialbereitstellungsplanung, ist der Einsatz genauso möglich, wie in der taktischen Produktionsplanung, welche Aspekte wie Linierversorgungskonzepte, Kapazitätsplanung, Materialanlieferung oder Logistikplanung beinhaltet (März und Weigert 2011, S. 8).

Wird zusätzlich die Klassifizierung von Produktionsunternehmen aus Abschnitt 2.1.2 betrachtet, so zeigt sich, dass die beste Voraussetzung für den Einsatz der Simulation im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung bei Unternehmenstypen der Lagerfertigung liegt (vergleiche Tabelle 8-1 im Anhang auf Seite 111). So liegt das größte Einsatzpotenzial der Simulation vor, wenn Standarderzeugnisse ohne Varianten mit geringteiler Erzeugnisstruktur und geringem Fremdbezug in einer Massenfertigung produziert werden. Der Einsatz der Simulation bei einer hohen Kundenspezifikation der Produkte und einer Einmalfertigung ist also weniger angebracht (Gierth und Schmidt 2006, S. 655).

### 2.3.2 Komponenten einer ereignisdiskreten Simulation

Ein System besteht allgemein aus verschiedenen Komponenten oder Elementen, die zueinander in Beziehung stehen und gegebenenfalls weiter zerlegt werden können. Durch Systemgrenzen wird das System von der Umwelt abgegrenzt und mit Hilfe von Schnittstellen kann es mit der Umwelt Materie, Energie und Informationen austauschen (Kuhn und Wenzel 2008, S. 76; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1). Modellelemente repräsentieren die Komponenten eines solchen realen Systems mit ihrem Verhalten und wer-

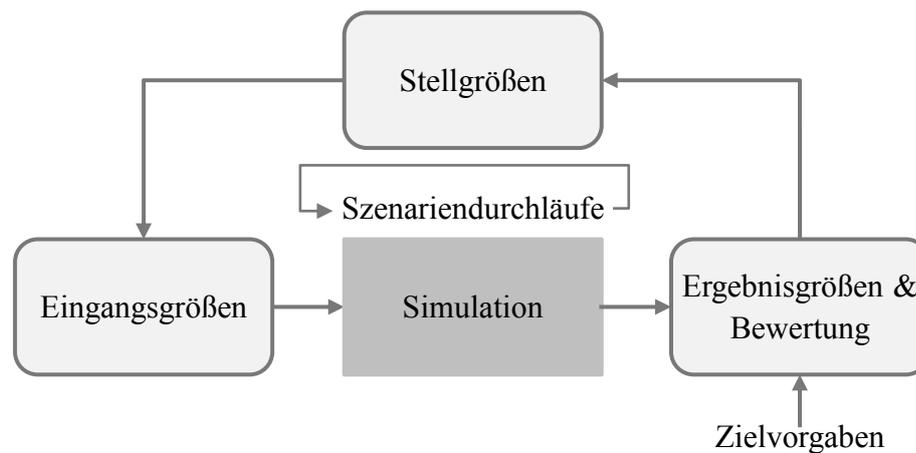
den je nach Ablauflogik bzw. dynamischen Eigenschaften in Objekt und Bausteine unterschieden. Objekte sind die Elemente, die keine eigene Ablauflogik besitzen, wie etwa Werkstücke, Fertigungshilfsmittel, bewegliche Elemente wie Werkstücke, Paletten und Transportmittel oder auch Informationsobjekte, wie Aufträge und Arbeitspläne. Sie können nur von außerhalb verändert werden. Bausteine hingegen besitzen eine interne Ablauflogik und steuern, wie sich das System verhält. Um die Schnittstellen zur Umwelt darzustellen werden Quellen und Senken benötigt, die die Ein- und Ausgangsgrößen beschreiben, die über die Systemgrenze ausgetauscht werden (VDI-Richtlinie 3633).

Insgesamt kann zwischen der Aufbau- und Ablaufstruktur eines Systems unterschieden werden. Relationen stellen dar, wie die Elemente miteinander verbunden sind (Aufbaustruktur) und ermöglichen so den Ablauf von Prozessen. Die Ablaufstruktur wird durch spezifische Regeln und Attribute (konstant oder variabel) beschrieben. Bei der Betrachtung von dynamischen Systemen ist zudem der Zustand relevant, denn nur durch ihn kann das System zu jedem Zeitpunkt, durch Angabe der Werte der Attribute, beschrieben werden (Kuhn und Wenzel 2008, S. 76; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1). Die Zustandsübergänge der Elemente beschreiben die Änderung von mindestens einer dieser Zustandsgrößen und laufen, wie bereits in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, diskret oder kontinuierlich ab.

Bei der ereignisdiskreten Simulation wird das System mittels Prozessen, Ereignissen und Aktivitäten dargestellt. Ereignisse bewirken Zustandsänderungen, verbrauchen keine Zeit und sind nicht zerlegbar. Sie können durch andere Ereignisse oder Zustände innerhalb des Modells bedingt sein (endogen) oder aber durch Ereignisse außerhalb des Modells (exogen) ausgelöst werden. Der Zustand, der durch ein Ereignis entstanden ist, hat solange Bestand, bis das nächste Ereignis eintritt. Eine Aktivität ist eine zeitbehaftete Operation, an deren Anfang und Ende jeweils ein Ereignis steht und die den Zustand eines Objekts transformiert. Zur Beschreibung von einer zeitlich geordneten und inhaltlich passenden Folge von Ereignissen dient der Prozess, der meist einem Objekt zugeordnet wird (Kuhn und Wenzel 2008, S. 79).

Die Daten einer Simulation werden unterschieden in Systemdaten und Modelldaten. Systemdaten sind die Daten, die das betrachtete System beschreiben, wohingegen die Modelldaten, wie in Abbildung 2-14 dargestellt, die Eingangs-, Experiment-, Simulationsexperiment- und internen Modelldaten beschreiben. Die Eingangsdaten oder auch Eingabedaten leiten sich aus den Systemdaten ab und sind zum Modellaufbau und der Experimentdurchführung notwendig. Sie können entweder durch einen Nutzer eingegeben oder aus anderen Programmen übernommen werden. Innerhalb des Modells sind noch die internen Modelldaten vorhanden, welche interne Konstanten oder auch während des Modells berechnete Variablen sein können und die nur intern verwendet wer-

den. Die Simulationsergebnisdaten geben nach oder während der Simulation über die erfolgten Zustandsänderungen der Modellelemente Aufschluss und werden während der Simulation gespeichert. Die Experimentdaten sind die Daten, die das entsprechende Experiment mit seinen Parametern beschreiben, wie die Anzahl der Simulationsläufe, die Kenngrößen der Zufallszahlengeneratoren und der verändernden Parameter des Modells. Das Zielsystem beschreibt die Zielgrößen, die durch die Variation der Parameter verbessert werden sollen und auf der sich die Auswahl einer Planungsalternative stützt (VDI-Richtlinie 3633; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1).



**Abbildung 2-14** Simulationsdaten in Anlehnung an März und Weigert (2011, S. 11)

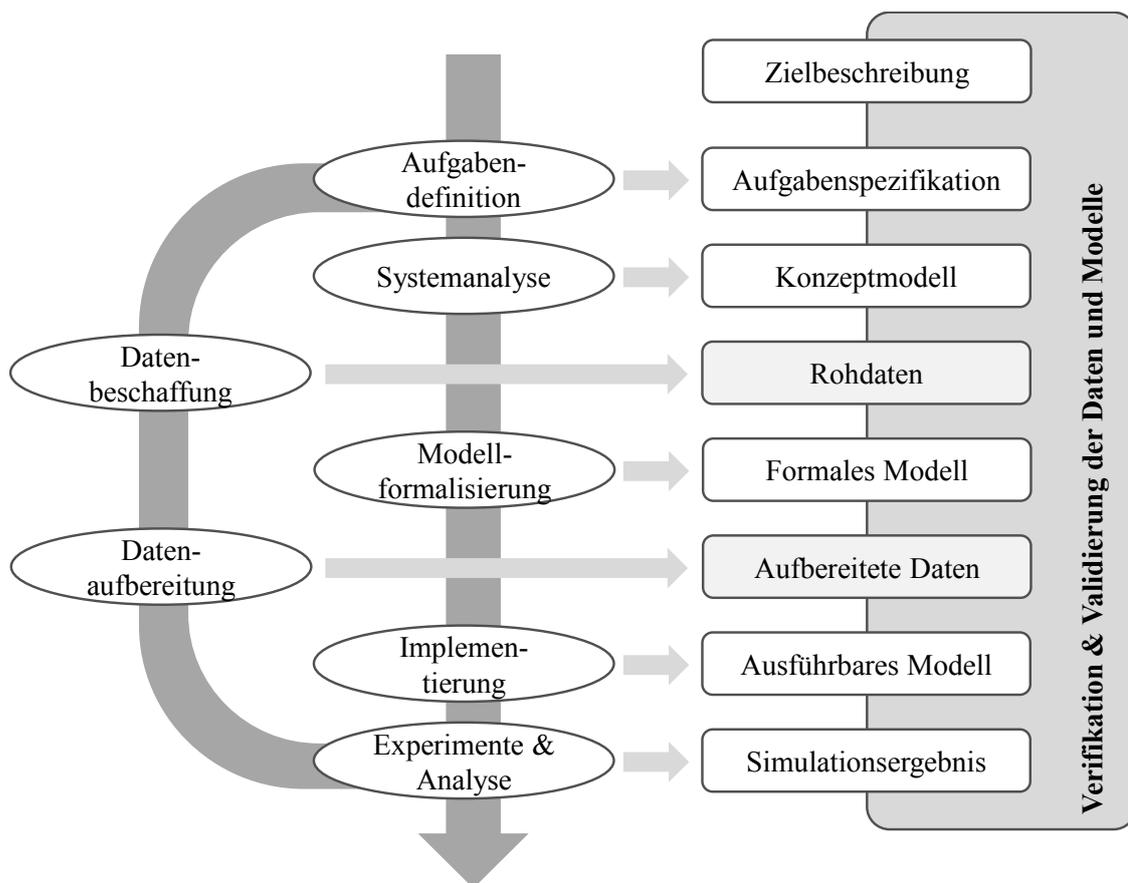
Neben dem Zustandsverhalten ist auch die Art und Weise des Fortschreitens der Simulation eine wichtige Komponente der Simulation. Die Simulationszeit bildet die im realen System vergangene Zeit im Modell ab. Eine Echtzeitsimulation ist vorhanden, wenn die Simulationszeit synchron zur realen Zeit im System verläuft. Bei ereignisdiskreter Simulation kann jedoch eine Echtzeitsimulation durch die diskreten Zeitpunkte der Zustandsänderung höchstens angenähert werden (VDI-Richtlinie 3633).

Bei Simulationen mit stochastischen Einflüssen wird außerdem ein Zufallszahlengenerator benötigt. Dieser stellt eine reproduzierbare Folge von Zufallszahlen einer vorgegebenen statistischen Verteilung mit bestimmten Eigenschaften zur Verfügung (VDI-Richtlinie 3633). Sind nur Minimal- und Maximalwerte bekannt und ist jedes Ereignis gleich relevant, so kann beispielsweise die Gleichverteilung verwendet werden. Die Normalverteilung hingegen beschreibt Ereignisse, die symmetrisch um einen Mittelwert schwanken (Eley 2012, S. 20), wie etwa zufällige Beobachtungs- oder Messfehler (Kuhn und Wenzel 2008, S. 82). Sie ist jedoch bei den meisten Produktionsdaten nicht geeignet, da sie nicht symmetrisch verteilt sind (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 3). Für die Modellierung von Zeitdifferenzen zwischen zufälligen Ereignissen, wie dem Eintritt von Störungen, kann etwa die Exponentialverteilung verwendet werden (Eley 2012, S. 20; Kuhn und Wenzel 2008, S. 82). Je nachdem wie das abzubildende Zufallsverhalten

aussieht eignen sich also unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen und der Wahl der Verteilung ist daher große Aufmerksamkeit zu widmen (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 3).

### 2.3.3 Vorgehensweise bei der Simulation

Eine Simulationsstudie beschreibt das Projekt zur Durchführung einer Simulation (Kuhn und Wenzel 2008, S. 85). Um Fehler mit Hilfe eines systematischen Vorgehens möglichst von Anfang an zu vermeiden, gibt es Vorgehensmodelle, die den Prozess der Modellentwicklung beschreiben (Rabe et al. 2008, S. 46 f.). Ein mögliches Simulationsvorgehensmodell ist das in Abbildung 2-15 dargestellte. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es die Daten und das Modell getrennt behandelt und aus jeder Phase einzelne Phasenergebnisse, also Dokumente und teilweise auch Modelle, resultieren. Außerdem erfolgt die Verifikation und Validierung (V&V) bei dieser Vorgehensweise phasenübergreifend während der gesamten Durchführung und nicht als getrennte Phase nur am Ende (Rabe et al. 2008, S. 4 f.).



**Abbildung 2-15** Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008, S. 5) bzw. VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1

Eine wichtige Entscheidung, die vor dem Beginn einer Simulationsstudie getroffen werden muss, ist die Prüfung der Simulationswürdigkeit. Dazu gehört neben dem Kosten-Nutzen-Verhältnis auch die Klärung der Frage, ob die Anwendung gerechtfertigt ist

oder vielleicht andere Methoden vorzuziehen sind. Für die Simulationswürdigkeit sprechen Gründe wie die Komplexität der Aufgabe, das Fehlen oder der hohe Aufwand von analytisch-mathematischen Modellen, genauso wie die wiederholte Nutzung des Simulationsmodells (Kuhn und Wenzel 2008, S. 87; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1).

Als Grundlage für die Simulationsstudie dient eine Zielvereinbarung, die beispielsweise in Form eines Lastenhefts oder einer Ausschreibung vorliegen kann. Sie definiert nicht nur die Ausgangslage und den Umfang der Studie, sondern auch Randbedingungen. Die grobe Funktionsweise des Systems und die zu erreichenden Ziele und erwarteten Ergebnisse sind in ihr festgelegt. Außerdem stehen Zeitpunkte, Budgetvorgaben oder auch Ressourcenvorgaben fest (Rabe et al. 2008, S. 58 f.). Aufbauend auf dieser Zieldefinition wird die Simulationsaufgabe definiert, dazu werden die Zielvorstellungen präzisiert und vervollständigt, sodass eine Beschreibung der Problemstellung vorliegt, die unter den vorhandenen Randbedingungen umsetzbar ist (Rabe et al. 2008, S. 47 f.).

In der Phase Systemanalyse wird das System analysiert und abstrahiert. Zuerst wird die Komplexität des Systems hinsichtlich der relevanten Merkmale sinnvoll zergliedert und darauf aufbauend wird das System reduziert und idealisiert. Dazu werden das System und seine Bestandteile festgelegt, wozu die Elemente, Systemgrenzen, Schnittstellen, Prozesse, Beziehungen, Annahmen, Vereinfachungen und auch Ein- und Ausgangsgrößen definiert werden. Außerdem werden die Aufbau- und Ablaufstruktur entwickelt. Dabei ist zu beachten, dass bei einem hohen Detaillierungsgrad das Simulationsergebnis zwar genauer wird, gleichzeitig aber auch der Aufwand des Simulationsexperiments zunimmt (Kuhn und Wenzel 2008, S. 77; Rabe et al. 2008, S. 48 f.). An dieser Stelle sei auch auf die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung verwiesen, welche von Becker et al. (Becker et al. 2012) detailliert erläutert werden. Sie stellen Kriterien bereit, mit denen die Konstruktion von Modellen bewerten werden kann. Sie erlauben eine qualitätsgerechte und vergleichbare Modellerstellung und beinhalten die folgenden sechs Grundsätze: den Grundsatz der Richtigkeit, der Relevanz, der Wirtschaftlichkeit, der Klarheit, der Vergleichbarkeit und des systematischen Aufbaus (Becker et al. 2012, S. 31 ff.).

Das aus dieser Phase entstehende Konzeptmodell beschreibt, wie die Aufgabe zu lösen ist und welchen Umfang und welche Detaillierung das Modell besitzt und gibt damit die Grundlagen für die Umsetzung vor. Diese beginnt mit der Formalisierung des Modells, in der nach einheitlichen Kriterien die Elemente und Beziehungen aus der vorhergehenden Phase beschrieben werden. Das daraus entstehende Modell muss so gestaltet sein, dass es im Idealfall eine Implementierung ohne weitere fachliche Rückfragen erlaubt. Um umfangreiche Datenstrukturen oder komplexe Algorithmen darzustellen, eignen sich an dieser Stelle allgemeingültige Beschreibungsmittel, wie etwa Struktogramme oder ähnliches (Rabe et al. 2008, S. 48 f.; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1). Das entstandene

formale Modell wird in ein ausführbares Modell umgesetzt. Dazu wird das Modell in ein Softwaremodell überführt. Für diese Implementation können unterschiedliche Simulationswerkzeuge benutzt werden.

Bevor mit der Phase „Experimente und Analyse“ der eigentliche Nutzen aus dem Simulationsmodell gewonnen werden kann, müssen die aufbereiteten Daten vorliegen. Damit diese zum richtigen Zeitpunkt vorhanden sind, müssen parallel zu den beschriebenen Phasen die Datenbeschaffung und –aufbereitung ablaufen (Rabe et al. 2008). Die Daten besitzen innerhalb einer Simulationsstudie eine wichtige Rolle, da die Qualität der Ergebnisse direkt von der Güte der verwendeten Daten abhängt und bei fehlerhaften oder unvollständigen Daten die Simulation unbrauchbar wird (Kohl 2014, S. 610). Die Simulationsergebnisse können demnach nur so gut sein, wie die Eingangsdaten der Simulation (Kuhn und Wenzel 2008, S. 87).

**Tabelle 2-5** Simulationsdaten nach VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1

Datenarten	Inhalte
<b>Systemlastdaten</b>	<b>Auftragseinlastung</b> Produktionsaufträge, Transportaufträge, Mengen, Termine
	<b>Produktdaten</b> Arbeitspläne, Stücklisten
<b>Organisationsdaten</b>	<b>Arbeitszeitorganisation</b> Pausenregelung, Schichtmodelle
	<b>Ressourcenzuordnung</b> Werker, Maschinen, Fördermittel
	<b>Ablauforganisation</b> Strategien, Restriktionen, Störfallmanagement
<b>Technische Daten</b>	<b>Fabrikstrukturdaten</b> Anlagentopologie (Layout, Fertigungsmittel, Transportfunktionen, Verkehrswege, Flächen, Restriktionen)
	<b>Fertigungsdaten</b> Nutzungszeit, Leistungsdaten, Kapazität
	<b>Materialflussdaten</b> Topologie des Materialflusssystems, Fördermittel, Nutzungsart, Leistungsdaten, Kapazität
	<b>Stördaten</b> Funktionale Störungen, Verfügbarkeiten

Allgemein unterteilen sich die benötigten Systemdaten, wie in Tabelle 2-5 dargestellt, in die drei Bereiche technische Daten, Organisationsdaten und Systemlastdaten (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1) und können entweder aus Aufzeichnungen der Produktion oder aber aus Planungsdaten stammen (Rabe et al. 2008). Abhängig vom festgelegten Untersuchungsziel und Aufgabenschwerpunkt unterscheiden sich die Komplexität und der Detaillierungsgrad der Daten (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1). Die Vorgaben für die Datenbeschaffung, wie die Art und der Umfang der Daten, ergeben sich daher aus der

Aufgabenspezifikation (Rabe et al. 2008, S. 6). Oft werden Daten aus mehreren IT-Systemen verwendet, was dazu führen kann, dass die Konsistenz der Daten nicht immer gewährleistet ist. Daher müssen die Rohdaten zunächst aufbereitet und auf deren Eignung validiert werden. Um den Aufwand bei der Erfassung und der Aufbereitung möglichst gering zu halten, sollten nach Möglichkeit gängige Datenformate verwendet werden.

Das resultierende Modell wird mit Hilfe von Experimenten und Analysen ausgeführt, dabei bezeichnet ein Simulationsexperiment eine „gezielte empirische Untersuchung des Modellverhaltens über einen bestimmten Zeithorizont durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischen Parametervariationen“ (VDI-Richtlinie 3633). Um mit möglichst wenigen Simulationsläufen das Simulationsziel zu erreichen, werden in der Experimentplanung die variierenden Parameterwerte definiert und die Reihenfolge der Simulationsläufe geplant (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1). Im Gegensatz zu den unterschiedlichen Simulationsläufen mit jeweils anderen Parametern, die in den Experimenten verwendet werden, müssen bei Verwendung von stochastischen Komponenten in der Simulation auch sogenannte Replikationen durchgeführt werden.

Replikationen besitzen jeweils gleiche Parameter, haben aber unterschiedliche Startwerte für die verwendeten Zufallszahlen und ermöglichen so eine statistische Sicherheit über die verwendeten stochastischen Komponenten (Rabe et al. 2008, S. 12; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 3). Da die Simulationsergebnisse immer nur einen Stichprobencharakter besitzen, wäre ohne diese Replikationen nicht gewährleistet, dass das System nicht genau im betrachteten Moment untypisches Verhalten zeigt. Je mehr Replikationen durchgeführt werden, desto zuverlässiger ist die Aussage, die aus dem Ergebnis gewonnen wird, jedoch erhöht sich auch der Aufwand (Wenzel 2008b). Eine ungefähre Näherung bietet die Abschätzung nach Law und McComas (Law und McComas 1991, S. 25), die besagt, dass aus mindestens 3-5 durchgeführten Replikationen der Durchschnitt gebildet werden soll. Allerdings gibt es keine verbindliche Regel für die Anzahl und Länge der Simulationsläufe (Rose und März 2011, S. 18).

Bei der Ausführung von Experimenten muss außerdem beachtet werden, dass die Erfassung von Simulationsergebnisdaten, wie Statistiken, nicht in jedem Fall während der ganzen Simulation repräsentativ ist. Dies gilt für die Abbildung von nicht terminierenden Systemen, die in der Simulation oftmals schwer darstellbar sind. Wenn das Simulationsmodell beispielsweise in einem Leerzustand startet, der im realen System nicht vorhanden ist, muss die Zeit bis das System einen typischen Betriebszustand erreicht hat aus der Betrachtung ausgeschlossen werden. Diese Phase nennt sich Einschwingphase (auch Anlaufphase, Warmlaufphase oder transiente Phase).

Synchron zu allen Vorgehen in der Simulationsstudie verläuft die Verifikation und Validierung der Daten und Modelle, welche die Überprüfung des Phasenergebnisses auf

Richtigkeit und Eignung umfasst (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, S. 37). Je nachdem wie sie ausfällt müssen einige Phasen erneut durchlaufen werden. Mit der Validierung wird überprüft, ob das Verhalten des Modells mit dem des abgebildeten Systems übereinstimmt, wohingegen mit der Verifikation die Transformation von einem Phasenergebnis in das nächste überprüft wird (Rabe et al. 2008, S. 14 f.). Somit stellt die Durchführung der Validierung sicher, dass sich das Modell gegenüber dem realen System hinsichtlich der Untersuchungsziele hinreichend genau verhält. Der Fokus der Verifikation liegt auf der Korrektheit der Programme oder Programmteile (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1). Teilweise wird zusammenfassend von Verifikation, Validierung und Test (VV&T) gesprochen, da Tests die Mittel zur V&V sind (Rabe et al. 2008, S. 16). Dabei ist anzumerken, dass die V&V immer subjektiv ist und die einzelnen Techniken demnach einen unterschiedlichen Grad an Subjektivität besitzen, der bei der Auswahl und Verwendung einer solchen Technik beachtet werden muss. Entsprechend der unterschiedlichen Phasen und Spezifikation von Simulationsstudien gibt es eine Vielzahl von Techniken zur Verifikation und Validierung. Eine Auswahl der in diesem Bereich hilfreichsten Techniken wird in Rabe et al (Rabe et al. 2008, S. 93) beschrieben.

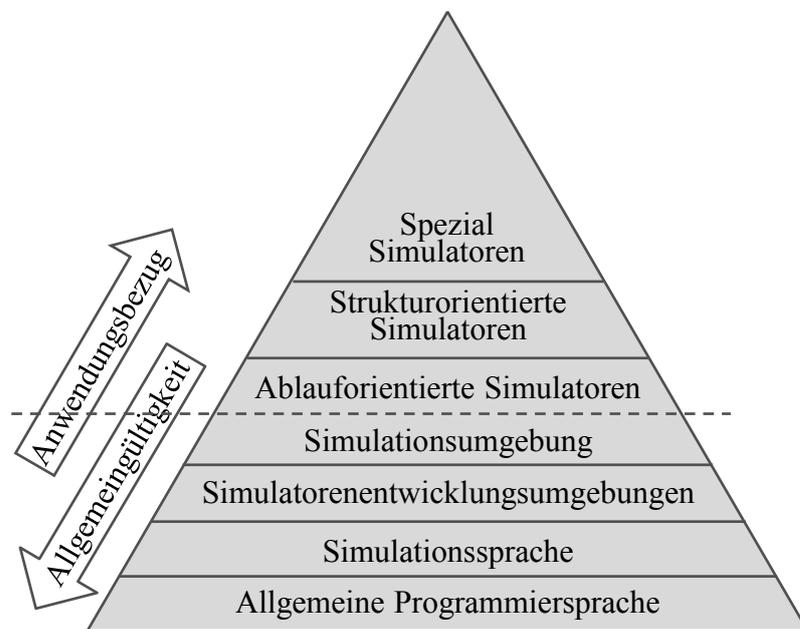
Entsprechend zu den verschiedenen Phasen, die in einer Simulationsstudie durchlaufen werden, eignen sich auch unterschiedliche Techniken für die jeweilige Phase. Tabelle 2-6 gibt dazu eine Auswahl von Techniken, die für diese Arbeit relevant sind, sortiert nach ihren Phasen wieder. Allgemein lässt sich bei den meisten der angewendeten V&V Techniken nicht einwandfrei differenzieren, zu welcher der beiden Kategorien sie gehören, und daher werden sie übergreifend mit dem Begriff Tests beschrieben (Wenzel 2008b, S. 33). Für einen detaillierten Einblick sei auf Tabelle 8-2 (im Anhang auf Seite 111) verwiesen, in der die einzelnen Techniken kurz erläutert werden und ihr Grad an Subjektivität dargestellt ist.

**Tabelle 2-6** Verwendbarkeit von V&V-Techniken im Verlauf der Simulationsstudie  
nach Rabe et al. (2008, S. 113)

<b>Phase</b> <b>V&amp;V Technik</b>	Zielbeschreibung	Aufgabenspezifikation	Konzeptmodell	Formales Modell	Ausführbares Modell	Simulationsergebnisse	Rohdaten	Aufbereitete Daten
Animation					X	X		
Begutachtung	X	X	X	X	X	X	X	X
Dimensionstest				X	X	X	X	X
Ereignisvaliditätstest					X			
Festwerttest				X	X	X		
Grenzwerttest				X	X	X		
Monitoring					X	X		X
Schreibtischtest	X	X	X	X	X	X	X	X
Sensitivitätsanalyse					X	X		X
Statistische Techniken					X	X	X	X
Strukturiertes Durchgehen	X	X	X	X	X	X	X	X
Test der internen Validität					X	X		
Test von Teilmodellen			X	X	X			
Trace-Analyse					X			
Turing-Test					X			X
Ursache-Wirkungs-Graph			X	X	X			
Validierung im Dialog	X	X	X	X	X	X	X	X
Validierung von Vorhersagen					X			
Vergleich mit anderen Modellen					X	X		
Vergleich mit aufgezeichneten Daten					X			

### 2.3.4 Simulationswerkzeuge

Die Wahl eines Simulationswerkzeugs hat einen hohen Stellenwert, denn diese kann anschließend, besonders nach dem Kauf eines Werkzeuges, kaum revidiert werden (Wenzel 2008b, S. 18). Die Auswahl eines Simulationswerkzeugs hängt vom Anwendungsfeld, der Aufgabenstellung und auch von der Gruppe der Anwender ab. Die wesentlichen Kriterien, die daher bei der Auswahl zu bedenken sind, sind neben der Softwarefunktionalität auch die Werkzeugentwicklung und der Produkteinsatz, aber auch die Service- und Marketingaspekte sind nicht zu vernachlässigen (Kuhn und Wenzel 2008, S. 85).



**Abbildung 2-16** Simulationswerkzeuge nach Wenzel (Wenzel 2008a) in Anlehnung an Eley (Eley 2012, S. 8)

Die Simulationswerkzeuge unterscheiden sich, wie in Abbildung 2-16 dargestellt, grundlegend durch ihren Anwendungsbezug und deren Allgemeingültigkeit. Auf der einen Seite befinden sich Programmiersprachen, welche sehr allgemeingültig sind, aber dafür einen geringen Bezug zur Anwendung besitzen und auf der anderen Seite existieren Spezialsimulatoren. Diese wurden für einen speziellen Anwendungsbereich erstellt und weisen dementsprechend eine geringe Allgemeingültigkeit auf. Im Bereich zwischen diesen beiden Extremen gibt es diverse Abstufungen dieser beiden Merkmale. Allgemeingültige Instrumente eignen sich bei unterschiedlichsten Problemen und Fragestellungen und besitzen viele Freiheitsgrade und Funktionalitäten. Sie haben einen hohen Komplexitätsgrad und benötigen daher eine lange Einarbeitungszeit oder müssen von einem Experten verwendet werden (Kuhn und Wenzel 2008, S. 83). Demgegenüber ermöglichen Simulatoren mit hochaggregierten Bausteinen einen benutzerfreundlichen und schnellen Aufbau sind dafür aber weniger flexibel und abbildungstreu (Schmidt 1988, S. 18 f.). In der Mitte befinden sich allgemeine Simulationsinstrumente, welche

---

nicht einen speziellen Bereich unterstützen, sondern beliebig einsetzbar sind (Eley 2012, S. 10 f.).

Allgemein wird bei den anwenderorientierten Simulationswerkzeugen durch ein bausteinorientiertes Modellierungskonzept das einfache Erstellen durch die Verwendung von vorkonfigurierten Standardmodellelementen, die entsprechend verknüpft, parametrisiert und teilweise auch angepasst werden können, ermöglicht. Bausteinorientierte Simulationswerkzeuge besitzen vordefinierte Bausteine, die jedoch in einem größeren Maße angepasst bzw. verändert werden können (VDI-Richtlinie 3633; Eley 2012, S. 10 f.).

## 3 Anforderungsdefinition

Das im Folgenden vorgestellte Konzept dient dazu, die Steuerung der Logistik- und Produktionsprozesse zu optimieren. Es besteht einerseits aus dem Traceabilitysystem, welches die reale Produktion widerspiegelt und andererseits aus dem Simulationsmodell, welches darauf aufbauend eine Prognose über den zukünftigen Status der Fabrik ermöglicht. Bei der Definition des Traceabilitysystems müssen daher die Anforderungen, die sich aus den Aspekten der Simulation ergeben, bereits mit einbezogen werden, denn nur wenn durch die Traceability die richtigen Daten aufgenommen werden, kann im Anschluss eine sinnvolle Prognose des Ressourcenverbrauchs erfolgen.

Zu Beginn wird der Betrachtungsraum des entstehenden Konzepts näher abgegrenzt und so die Randbedingungen und Systemschnittstellen ausgearbeitet. Im Anschluss werden die detaillierten Anforderungen, die an das Konzept gestellt werden, ausgearbeitet. Dazu gehören einerseits die Forderungen, die aus den Qualitäts-, Kosten und Zeitaspekten resultieren und andererseits die Anforderungen, die aus der Simulation resultieren.

### 3.1 Abgrenzung des betrachteten Systems

Im Fokus des Konzepts liegen die Produktions- und Logistikprozesse, weswegen die externen Verbindungen zu den Zulieferern oder Kunden im Umfang dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Daher wird ein internes Traceabilitykonzept entwickelt, welches jedoch so gestaltet wird, dass eine Erweiterung auf die weiteren Ebenen der Supply Chain prinzipiell mit nur geringen Änderungen realisierbar ist. Innerhalb dieser Fabrik wird dann die gesamte Lieferkette, angefangen beim Wareneingang bis hin zum Warenausgang, mit allen Produktions- und Logistikprozessen aufgenommen.

Da wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben das Einsatzpotential der Simulation im Produktionsbetrieb abhängig vom vorliegenden Fertigungstyp ist, muss abgewogen werden, in welchem Anwendungsgebiet das Konzept sinnvoll angewendet werden kann. Beispielsweise ist ein solches Konzept bei einem Auftragsfertiger nicht angemessen. Dies liegt daran, dass eine Prognose anhand vorher definierter Parameter nicht umsetzbar ist, wenn jeder Auftrag individuelle Kundenspezifikationen enthält. Grund dafür ist, dass in diesem Fall beispielsweise Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten oder ähnliches nicht vorliegen, sondern nur anhand von gegebenenfalls vorhandenen ähnlichen Aufträgen geschätzt werden können. Auf der anderen Seite ist auch ein reiner Lagerfertiger für dieses Konzept nicht geeignet. Wird in großer Menge mit einer getakteten Fließfertigung und Fließmontage auf Lager produziert, so herrscht wenig Optimierungsbedarf bei der Verknüpfung der einzelnen Produktions- und Logistikprozesse, da zwischen ihnen eine enge Taktung besteht. Das zu entwickelnde Konzept ist daher bei einem Unternehmen,

das zwischen diesen beiden Typen liegt, also in einem gewissen Maß sowohl kundenspezifisch und auf Lager fertigt, am besten anwendbar.

Im Detail bedeutet dies, dass Standarderzeugnisse mit einer geringen Varianz hergestellt werden; diese können eine mehrteilige Struktur besitzen, welche jedoch einfach gehalten sein sollte. Außerdem sollte die Fertigung nicht einzeln sondern zumindest in kleinen Serien erfolgen, bei denen die Fertigung überwiegend ablauforientiert gestaltet wird. Diese Merkmale begünstigen eine relativ einfache Modellierung, müssen aber nicht unbedingt erfüllt sein.

Der Automatisierungsgrad der Fertigung grenzt das betrachtete System weiter ein, denn je nach Einsatzort und Umfang der Automatisierung eignet sich das Konzept weniger gut. Bei einer vollständigen Automatisierung im Bereich der Logistik ist das Konzept nicht sinnvoll, denn wenn die Kommissionierung und Belieferung durch ein automatisch gesteuertes System erfolgt, braucht diese nicht mit Hilfe des Modells abgebildet zu werden. Dies liegt daran, dass in diesem Fall bereits durch das steuernde System in der Regel eine Optimierung erfolgt. Liegt jedoch eine Automatisierung innerhalb einzelner Produktionsprozesse vor, zum Beispiel durch den Einsatz von Robotern, so soll die Produktion dennoch mit dem Modell darstellbar sein. Dies ist dadurch begründet, dass das Ziel die geeignete Verkettung zwischen den Produktionsprozessen und den Logistikprozessen ist und die Produktionsprozesse im Detail nicht optimiert werden sollen. Das betrachtete System ist demnach geeignet, wenn die Logistikprozesse durch Mitarbeiter ausgeführt werden.

## 3.2 Anforderungen an das Traceabilitysystem

Das Hauptziel des Traceabilitysystems ist, die Parameter, die für die Nachverfolgung von Ressourcen mit Hilfe des Simulationsmodells benötigt werden, zu generieren. Dazu nimmt es den aktuellen Zustand der Fabrik auf. Für diesen Zustand muss definiert werden, welche Daten rückverfolgt werden müssen und welche Prozesse dazu nötig sind.

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben soll die Fertigung vom Wareneingang bis zum Warenausgang betrachtet werden. Für die Traceability bedeutet dies, dass innerhalb dieses Bereichs die Objekte, die die Fertigung durchlaufen, nachverfolgbar sein sollen. Dabei wird die Fertigung sowohl aus produktions- als auch aus logistischer Sicht betrachtet. Ein Produkt durchläuft also vom Wareneingang bis zum Warenausgang nicht nur mehrere Wertschöpfungsstufen, wie etwa mechanische Bearbeitungen oder Montagen, sondern auch nicht direkt wertschöpfende Tätigkeiten wie die Materialbereitstellung oder den Transport. Damit erfasst werden kann, wann sich das Objekt an welcher dieser Stationen befunden hat, muss der Warenfluss an den Informationsfluss gekoppelt sein.

Das Traceabilitysystem soll in der Lage sein, die Daten von all diesen Stationen zu ermitteln und in einer passenden Form zu speichern. Wichtig ist, dass diese Daten in einer Form vorhanden sind, die zu denen vom Simulationsmodell benötigten passen. Im Detail muss dazu definiert werden welche Objekte rückverfolgt werden, welche Daten für sie aufgenommen werden und wie dies (also mit welchen Techniken) umsetzbar ist. Das Traceabilitykonzept soll dabei so gestaltet sein, dass es die Mitarbeiter nicht im Ablauf behindert und möglichst keinen zusätzlichen Aufwand erfordert.

Zusätzlich zu der Aufnahme des Werdegangs der Produkte durch die Produktion, also der Prozesstraceability, muss auch deren Zusammensetzung aus unterschiedlichen Komponenten abgebildet werden. Diese Produkttraceability ermöglicht die ordentliche Dokumentation der im Endprodukt enthaltenen Bestandteile. Zwar ist die Qualitätssicherung bzw. die Verhinderung von Rückrufaktionen kein vorrangiges Ziel des Konzepts, jedoch sollen durch das System auch weitere Vorteile, beispielsweise im Bereich der Qualität, erzielt werden können.

Neben den beiden Formen der Traceability, die gefordert sind, muss das Traceabilitysystem auch die richtigen Daten an das Simulationsmodell liefern können, weswegen die erhobenen Daten entsprechend übertragen werden müssen. Im Prinzip muss das Traceabilitysystem dazu eine geeignete Schnittstelle besitzen, die die erfassten Parameter in das Simulationskonzept einspeist. Im Rahmen dieser Arbeit steht diese jedoch nicht im Fokus und wird daher nicht näher betrachtet. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass diese in Form eines MES oder ähnlichen Systems vorliegen und direkt von der Simulation aufgerufen werden können.

Damit das Modell universal auf unterschiedliche Fabriken anwendbar ist und in der Simulation umgesetzt werden kann, müssen allgemein anwendbare Regeln zu den rückverfolgbaren Objekten, den aufgenommenen Daten und somit den Parametern für die Simulation aufgestellt werden. Dies ermöglicht dann die einfache Anwendung des Konzepts auf die jeweils vorliegenden individuellen Prozesse. Dabei ist es wichtig, dass die Umsetzung des Traceabilitykonzepts nicht zu aufwendig und kostenintensiv wird. Zudem sei auch noch auf die in Abschnitt 2.2.3 dargestellten allgemeineren Anforderungen an Traceability hingewiesen, die selbstverständlich erfüllt werden müssen.

### 3.3 Anforderung an das Simulationskonzept

Die Simulation gliedert sich direkt an das Traceabilitysystem an und muss in der Lage sein, die Parameter, die den aktuellen Zustand wiedergeben, aufzunehmen und weiterzuverarbeiten. Ziel ist es, aus der aktuellen Situation eine Prognose zu erstellen, wie die Produktion unter denselben Bedingungen nach einer gewissen Zeit aussieht. Abhängig von dem resultierenden Ergebnis sollen dann an dem Modell Veränderungen erprobt werden können, sodass die Wirkzusammenhänge in der Fabrik deutlich und Verbesserungsmaßnahmen ersichtlich werden.

Dazu muss die Simulation die Fabrik in einer hinreichenden Genauigkeit mit seiner Aufbaustruktur und dem Ablaufverhalten wiedergeben. Um dies zu ermöglichen, müssen Elemente und Steuerungen der Simulation entwickelt werden, sodass eine Fabrik, die den in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungen genügt, einfach darstellbar ist. Dazu müssen neben der Identifizierung der benötigten Elemente auch die Daten, die als Datenbasis für das Modell benötigt werden, definiert werden. Das entstehende Modell muss in der Lage sein, die aus dem Traceabilitysystem abgegriffenen Daten in das Modell zu übertragen und daraus den Anfangszustand zu generieren. Die weiteren Daten, die aus der Produktion beschafft werden müssen, werden definiert und begründet.

Mit Hilfe von Simulationsläufen werden eine Prognose über den weiteren Verlauf und Statistiken über die Auslastung der einzelnen Elemente erzeugt. Im Detail soll für jedes einzelne Objekt, das die Fabrik durchläuft, in einem Datensatz der Werdegang niedergeschrieben werden. Welche Daten dazu relevant sind, muss unter Betrachtung der Ergebnisse des Traceabilitykonzepts definiert werden. Außerdem soll erkennbar sein, aus welchen Komponenten eine Endkomponente besteht.

Neben den Darstellungen der Fabrik unter realen Bedingungen soll mit dem Modell außerdem experimentiert werden können. Dazu sollen gewisse Parameter, die im Vorfeld definiert wurden, manuell anpassbar sein. Mit Hilfe der Experimente kann dann ein möglichst optimaler Arbeitspunkt gefunden werden. Dazu müssen zusätzlich die für diesen Fall wichtigsten Parameter definiert werden.

Wichtig bei der Erstellung des Simulationsmodells ist, dass das Modell nur die Komponenten betrachtet, die sinnvoll sind, und nicht detaillierter als notwendig ist. Ein geeignetes flexibles Bausteinkonzept, das die schnelle und einfache Anpassung des Modells an einen Anwendungsfall erlaubt, soll verwendet werden. Außerdem sollte der Aufwand dem Nutzen gerecht werden. Das heißt, das Modell sollte nur die für die Erreichung der Ziele notwendigen Elemente abbilden und nicht unnötig detailliert sein. Dazu sei noch einmal auf die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung (Abschnitt 2.3.3) hingewiesen, die bei der Modellierung beachtet werden sollten. Dies verkürzt die Rechenzeit, so dass das Modell möglichst nah an der Echtzeit ausgeführt werden kann.

## 4 Entwicklung des Traceabilitysystems

Im folgenden Kapitel wird das Traceabilitysystem entwickelt, welches die für die Nachverfolgung von Ressourcen benötigten Parameter liefert und weitere Vorteile ermöglicht. Bei der Entwicklung des Konzepts wird mit der Definition der identifizierbaren Objekte begonnen, um dann die durch das System betrachteten Prozesse innerhalb der Fabrik näher zu klassifizieren. Aufbauend auf den betrachteten Objekten und Prozessen werden die zur Erreichung der Ziele benötigten Daten definiert. Nachdem diese Parameter feststehen, wird im Folgenden kurz darauf eingegangen, auf welche Art und Weise die Daten erhoben werden können. Dazu werden die Art der Identifizierungstechnik, sowie die Datenformate und systemtechnischen Voraussetzungen kurz betrachtet.

### 4.1 Definition der identifizierbaren Objekte

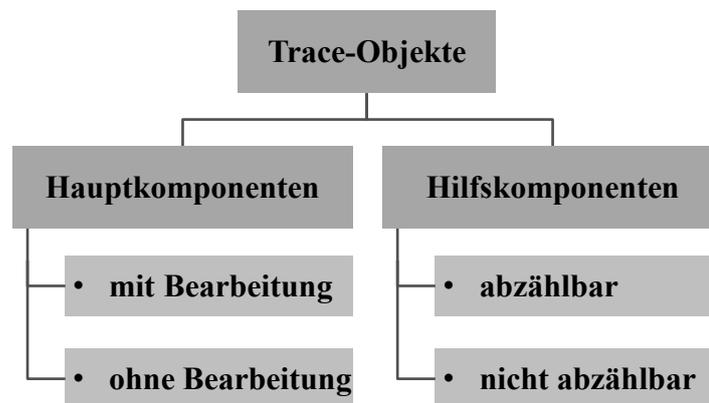
Eine grundlegende Voraussetzung für die Verwendung eines Traceabilitysystems ist, wie bereits in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, die eindeutige Identifizierung der Objekte (über deren Lebensdauer). Dabei muss nicht nur betrachtet werden welche Trace-Objekte in welchen Einheiten verfolgt werden, siehe Abschnitt 2.2.4, außerdem müssen weitere Objekte in der Fabrik identifizierbar sein. Denn nur wenn alle Elemente, die einen Einfluss auf die Trace-Objekte haben, ebenfalls erfasst werden, können die passenden Analysen und Auswertungen erfolgen. Daher erfolgt im Folgenden neben der Definition der benötigten Trace-Objekte auch eine Definition der Objekte, die zudem identifizierbar sein müssen.

#### 4.1.1 Definition der rückverfolgbaren Objekte

Die Objekte, die die Fertigung durchlaufen, sind von unterschiedlicher Art und weisen dementsprechend unterschiedliche Eigenschaften auf. Daher kann nicht pauschal gesagt werden, ob die Teile in Einheiten wie Fertigungschargen oder einzeln identifizierbar sein sollen. Sie müssen, abhängig von der Art der Teile, wie etwa der zugehörigen Werkstoffgruppe (vergleiche Abschnitt 2.1.1), definiert werden. Aus den betrachteten Objekten werden die Betriebsstoffe (hier beispielsweise Maschinenschmiermittel) ausgeklammert, da sie zwar zur Erzeugung der Endprodukte benötigt werden, aber nicht direkt in das Produkt eingehen. Zwar ist das Vorhandensein dieser Betriebsstoffe wichtig für den Produktionsprozess, jedoch werden die Nachfüllvorgänge meist unabhängig und auch wesentlich seltener als die restlichen Materialbelieferungen ausgeführt. Die Abbildung dieser Vorgänge würde die Komplexität des entstehenden Konzepts für einen geringen Informationsgewinn unnötig erhöhen und erfolgt daher nicht.

Die restlichen Objekte (Rohstoffe, Zukaufteile und Hilfsstoffe) werden im Rahmen dieser Arbeit, je nachdem welchen Beitrag sie zum Endprodukt haben, in zwei verschiede-

ne Kategorien unterteilt. Die Hauptkomponenten sind die Teile, die einen großen Anteil am Wert des Endproduktes ausmachen und entsprechend in der definierten Menge bezogen werden. Sie enthalten sowohl die Komponenten, die bearbeitet werden, als auch diejenigen, die lediglich zugekauft werden und in der Montage eingehen. Dem hingegen werden die Teile, die einen geringen Wert haben und nicht auftragsbezogen bereitgestellt werden, als Hilfskomponenten bezeichnet. Dies betrifft sowohl die abzählbaren Komponenten wie Schrauben oder Dichtungen als auch die Komponenten, die nicht abzählbar sind (wie etwa Schmieröl oder Dichtmasse). Diese Unterteilung in vier verschiedene Gruppen, welche in Abbildung 4-1 dargestellt ist, dient dazu, jeweils individuell die Art der Identifizierung festzulegen.



**Abbildung 4-1** Betrachtete Trace-Objekte

Bei den Hauptkomponenten ist eine Betrachtung als Einheit in Form von Losen zwar prinzipiell angemessen, da die Fertigung in der Regel auch in Losen erfolgt. Dagegen spricht allerdings, dass die Komponenten auch unabhängig von der Fertigungslosgröße transportiert werden können. Teilweise werden die Losgrößen für den Transport aufgeteilt oder Lose neu gebildet, sodass eine individuelle Verfolgung bei diesen Komponenten vorzuziehen ist. Zwar ist diese Form der Verfolgung kostenintensiver, da der Aufwand höher ist, sie birgt jedoch durch die detaillierten Einsichten viele Verbesserungsmöglichkeiten. Die Produktion kann detaillierter analysiert werden, da so über jede der Hauptkomponenten viele individuelle Informationen vorliegen. Der höhere Aufwand, der daraus resultiert, ist auch dadurch tolerabel, dass er nur bei der Betrachtung der Komponenten mit höherem Wert getrieben wird. Bei diesen sind die Auswirkungen und Optimierungsbedarfe dementsprechend meist bedeutender. Um die gemeinsame Verfolgung der Objekte auf einem Ladungsträger oder in Losen zu betrachten und den Aufwand zu reduzieren, können diese dann entsprechend verknüpft und über eine gemeinsame Nummer getrackt werden. Die Unterteilung in die beiden verschiedenen Gruppen innerhalb der Hauptkomponenten hat zu diesem Zeitpunkt keinen Einfluss, wird aber später bei der Betrachtung der aufgenommenen Daten und Datensätze relevant sein.

Bei den Hilfskomponenten fällt auf, dass die Identifizierung jeder einzelnen Komponente nicht sinnvoll ist, da die Komponenten einen geringeren Wert besitzen und der Aufwand einer solchen Vorgehensweise sehr hoch wäre. Werden diese hingegen jeweils in Einheiten verfolgt, so ist der Aufwand geringer, da beispielsweise jeweils ein einzelner Chargenbehälter einfach und unkompliziert eingescannt oder auf anderem Wege identifiziert werden kann. Für diese Vorgehensweise spricht auch, dass diese Komponenten oftmals in denselben Chargen oder sogar Behältern, in denen sie im Wareneingang angeliefert werden, direkt an die Produktionslinie gebracht werden können, da keine auftragsgerechte Bereitstellung erfolgt. Dies widerspricht dem Gedanken einer individuellen Verfolgung jedes einzelnen Elementes in einer solchen Einheit. Bei den Hilfskomponenten sind zudem oftmals nur Informationen über die gesamte Einheit vom Lieferanten verfügbar. So werden von den zählbaren Komponenten in der Regel nur Daten vom Lieferanten von einer gesamten Einheit und nicht von jedem Artikel verfügbar sein. Bei den nicht abzählbaren Komponenten ist die einzelne Verfolgung sogar nicht möglich, da sie nicht zu portionieren sind und nur im Ganzen transportiert und bereitgestellt werden können. Bei den Hilfskomponenten wird daher die Verfolgung einer Einheit, die der Behältergröße entspricht, empfohlen.

#### **4.1.2 Kategorisierung der Objekte in der Fabrik**

Die weiteren Objekte, die einen Einfluss auf die Trace-Objekte haben, müssen eindeutig identifizierbar sein, denn nur wenn eindeutige Zuordnungen möglich sind, ist eine unmissverständliche Verwendung der Daten, die über das Trace-Objekt geschrieben wurden, möglich. Zu den wichtigsten Objekten gehören die jeweiligen Aufenthaltsstationen der Trace-Objekte. Diese Orte können sowohl die Arbeitsstationen, also die Montage und Bearbeitungsplätze, aber auch die Lagerplätze, wie Abstellflächen, Regalplätze, Paletten oder ähnliches sein. Werden diese Daten erhoben, so kann am Ende zum Beispiel analysiert werden, ob das Trace-Objekt an einem Ort unnötigerweise gelagert wurde und somit können fehlerhafte Abläufe aufgedeckt werden. Zusammen mit der Aufenthaltsdauer kann außerdem deutlich werden, an welchem Ort das Objekt außerordentlich lang warten musste, sodass Engpässe ermittelt werden können. Um diese Daten jedoch aufnehmen zu können, muss jeder Ort von den anderen unterscheidbar sein, was durch einen eindeutigen Namen oder aber auch eine Identifikationsnummer gewährleistet werden kann. Je nach Größe einer solchen Station kann auch eine Unterteilung in unterschiedliche Unterstationen sinnvoll sein, wenn zum Beispiel voneinander unabhängige Montagen oder ähnliches vorliegen, die klar trennbar sind.

Um eine Einheit von mehreren Objekten gleichzeitig zurückzuverfolgen, wird die eindeutige Identifizierung von Ladungsträgern, wie Paletten, Regalwagenplätzen oder Ähnlichem, notwendig. Durch eine eindeutige Identifikationsnummer und der Zuordnung der Trace-Objekte zu diesen, wie in Abschnitt 2.2.6 beschrieben, wird die Rück-

verfolgung erleichtert. Außerdem kann dadurch die Anzahl der Handlingsstufen deutlich werden, denn wenn ein Trace-Objekt häufig von einem Ladungsträger in den nächsten umgepackt wurde, wird dieses in dem Werdegang und den unterschiedlichen Ladungsträgern in ihm ersichtlich. Dies kann dann unnötige Umpackvorgänge aufdecken, die sonst unter Umständen nicht entdeckt worden wären.

Eine Identifizierung der Mitarbeiter ist sinnvoll, aber aus datenschutztechnischen Gründen nicht immer möglich. Wenn die Mitarbeiter eindeutig zuzuordnen sind, ergeben sich viele Optimierungsmöglichkeiten. Durch die Auswertung von aufgezeichneten Daten lassen sich individuelle Leistungsgrade bestimmen oder feststellen, ob Schulungsbedarf besteht. Falls dies aus datenschutztechnischen oder ähnlichen Gründen jedoch nicht möglich ist, sollten zumindest weniger detaillierte Informationen über die Mitarbeiter gesammelt werden. Dazu gehören die unterschiedlichen Rollenprofile, die in der Produktion verfügbar sind, mit ihrer jeweiligen Menge aber auch die Anzahl der Mitarbeiter, die an einem bestimmten Ort verfügbar sind. Mit Hilfe dieser Daten können die Auslastungen der Mitarbeiter bestimmt und optimiert werden. Somit können die Vorgabezeiten, die für die Einplanung von Aufträgen notwendig sind, realistischer gestaltet werden. Dies ist notwendig, da die Logistik durch solche genauen Vorgabezeiten erst planbar wird.

Genauso kann eine Identifizierung der benutzten Transportmittel, wie Gabelstapler oder Hubwagen, sinnvoll sein, da für diese ebenfalls die Auslastung bestimmt werden kann. Dies ist jedoch nur dann angemessen, wenn die Mitarbeiter nicht permanent an das Transportmittel gebunden sind und nur temporär auf das Transportmittel zugegriffen wird. In dem hier vorhandenen Konzept wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Mitarbeiter solche Betriebsmittel permanent nutzen und daher erfolgt die einzelne Betrachtung dieser nicht.

Eine Voraussetzung, die in den meisten Produktionen bereits erfüllt sein dürfte, ist die der eindeutigen Identifizierung von Aufträgen. Ist dies vorhanden, kann den Trace-Objekten bereits frühzeitig deren Bestimmungszweck zugeordnet werden und sie können in Echtzeit verfolgt werden. Durch eine Prognose kann dann erkannt werden, ob der Auftrag rechtzeitig erfüllt werden kann oder ob Anpassungen der Bedingungen erforderlich sind. Insgesamt müssen die folgenden Objekte eindeutig identifizierbar sein:

- Rückverfolgbare Objekte - Hauptkomponenten
- Rückverfolgbare Einheiten – Hilfskomponenten
- Ladungsträger (Paletten/ Regalwagen...)
- Mitarbeiter (aufgabenbezogen)
- Orte (Arbeitsstationen, Lagerplätze: Stellplätze, Pufferplätze)
- Aufträge

## 4.2 Charakterisierung notwendiger Prozesse

Damit eine einheitliche Betrachtung von unterschiedlichen Produktionen nach dem gleichen Muster erfolgen kann, werden im Folgenden die wesentlichen Prozesse einer Produktion klassifiziert. Für diese Prozesse können dann anschließend die aufzunehmenden Daten und Parameter definiert werden. Ziel ist die Definition einer geringen Anzahl von einheitlichen Bausteinen. Mit diesen soll das Konzept einfach auf unterschiedliche Produktionen angewendet werden können, indem die Prozesse in die entsprechend definierten Kategorien eingeordnet werden.

Im Prinzip besteht die Produktion aus einer Abfolge von wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Prozessen, wovon allgemein betrachtet die Produktionsprozesse die wertschöpfenden und die Logistikprozesse die nicht wertschöpfenden Tätigkeiten ausmachen. In den nicht wertschöpfenden Tätigkeiten durchlaufen die Komponenten keine Änderungen, sodass zum Beispiel die Materialnummer, die die Art der Komponente angibt, gleich bleibt. Die wertschöpfenden Stufen hingegen verändern die Komponenten, sodass entweder nur eine Komponente mit Veränderungen oder aber aus mehreren Komponenten ein neues Objekt generiert wird. Dies bewirkt, dass andere Komponenten entstehen, die auch eine andere Materialnummer besitzen.

Bei den Produktionsprozessen werden die zwei Gruppen Montage- und Bearbeitungsstationen definiert. Die Unterscheidung in diese beiden Prozessarten ist sinnvoll, da sich die Komplexität der Vorgänge unterscheidet und dementsprechend unterschiedliche Daten aufgenommen werden müssen. Außerdem gilt, dass die Zeiten an der Bearbeitungsstation größtenteils prozessbedingt sind, wohingegen die Zeiten an der Montagestation hauptsächlich durch den Mitarbeiter bedingt sind.

Die Montagestation ist dadurch charakterisiert, dass sich die Anzahl der eingehenden Komponenten von der Anzahl der ausgehenden Komponenten unterscheidet, wohingegen bei der Bearbeitungsstation dieselbe Anzahl an Komponenten in die Station eingehen wie auch ausgehen. Die Montagestation beschreibt also alle Produktionsprozesse, bei denen mehrere Komponenten zusammengefügt werden. Dies hat die Konsequenz, dass in dieser Station neue Teile entstehen und die eingehenden nicht mehr existieren bzw. von den neuen Komponenten zusammengefasst werden. Außerdem kann immer erst dann der Prozess durchgeführt werden, wenn alle benötigten Komponenten vorhanden sind. Im Prinzip lässt sich mit diesem Typ auch eine Demontage beschreiben, bei der aus einem Teil mehrere Komponenten entstehen. Dieser Fall wird jedoch im weiteren Verlauf nicht näher betrachtet.

Im Gegensatz zu den Montagestationen ist eine Bearbeitungsstation weniger komplex, da dort die eingehenden Komponenten nach der Bearbeitung in veränderter Form wieder austreten, die Anzahl der Komponenten aber unverändert bleibt. Außerdem müssen zur Bearbeitung keine weiteren Teile vorhanden sein, sondern der Prozess kann ausge-

führt werden, sobald er bereit ist. Die einzige Ausnahme besteht, wenn eine losweise Fertigung vorliegt, da in diesem Fall teilweise erst dann angefangen werden kann, wenn das gesamte Los bereit steht.

Die Logistikprozesse werden unterteilt in Transportvorgänge, Lagerung und Kommissionierung beziehungsweise Vereinzeln. Unter Kommissionierung wird hier nicht nur das Kommissionieren zu einem Auftrag, sondern auch das Zusammenstellen von mehreren Objekten einer Art zu einer Einheit auf einem Ladungsträger bezeichnet. Wobei eine Kommissionierung als eine Art der Montage betrachtet wird, da aus mehreren unterschiedlichen Komponenten eine neue Komponente entsteht. Die neue Komponente, die entsteht, ist in diesem Fall statt dem resultierenden Bauteil jedoch ein kommissionierter Auftrag mit der Bereitstellung auf einem Ladungsträger. Das sortenreine Zusammenstellen auf einem Ladungsträger ist dabei eine Vereinfachung, da statt verschiedener nur eine Komponentenart in einer gewissen Menge kommissioniert wird. Die Vereinzelnung, also das Vereinzeln von mehreren Bauteilen, die auf einem Ladungsträger waren, kann dementsprechend genau wie die Demontage betrachtet werden, da aus einem Objekt (dem Ladungsträger mit seinem Inhalt) viele Komponenten werden.

Die Lagerung ist zwar im eigentlichen Sinne kein Prozess, wird aber hier als Prozessbaustein definiert, da sie ein zu durchlaufender Schritt in der Produktionskette ist. Mit der Lagerung wird sowohl die Bereitstellung der Objekte direkt an den Arbeitsstationen aber auch die längerfristige Lagerung in einem Lager beschrieben. Bei diesen beiden Typen erfolgt prinzipiell keine Unterscheidung, da in beiden Fällen ein Teil ohne Veränderung eine Zeitdauer an einem Ort verweilt.

Der Transport beschreibt jeden Vorgang, der ein Objekt von einem Ort zu einem anderen bringt. Dabei wird die direkte Weitergabe von Objekten an benachbarte Arbeitsstationen, also einer sogenannten Fertigungslinie, nicht als Transport bezeichnet, da sie eine direkte Weitergabe durch den Bearbeiter sind und in einer detaillierten Optimierung der Prozesse betrachtet werden müssen. Nur die Transportprozesse, die extern, also von Logistikmitarbeitern durchgeführt werden, sind im Rahmen dieses Konzepts als Transport klassifiziert. Innerhalb des Konzepts werden also die direkten Weitergaben, die durch die Mitarbeiter an der Linie selbst erfolgen, vernachlässigt.

Insgesamt können alle für dieses Konzept benötigten Komponenten einer Produktion durch die hier definierten 6 Prozessbausteine, die in Tabelle 4-1 mit deren Merkmalen zusammengefasst sind, beschrieben werden. Um aus ihnen die Produktion nachzubilden, können sie entsprechend aneinander gereiht werden.

Prinzipiell liegt vor einer Arbeitsstation und nach einer immer ein Lagerplatz, da davon ausgegangen wird, dass ein Prozess nicht direkt vom Transport ohne Zwischenlagerung beliefert wird. Wobei eine Arbeitsstation hier nicht nur die Montage und die Bearbeitung, sondern auch die Vereinzelnung und die Kommissionierung bezeichnet. Bei zwei

miteinander in Takt gebrachten Arbeitsstationen ist es zwar prinzipiell möglich, dass zwischen den beiden kein Lagerplatz liegt und eine direkte Weitergabe erfolgt. Dieser Sonderfall der Taktung von unterschiedlichen Prozessen würde im Rahmen des Konzeptes jedoch als eine Station zusammengefasst werden. Sowohl auf eine Arbeitsstation als auch auf einen Transport folgt jeweils ein Lagerplatz.

**Tabelle 4-1** Definierte Prozessbausteine zur Beschreibung der Produktion

<b>Produktionsprozesse wertschöpfende Prozesse</b>	<b>Logistikprozesse nicht wertschöpfende Prozesse</b>
<p><b>a. Montage</b> Mehrere Komponenten ergeben eine neue Komponente</p> <p><b>b. Bearbeitung</b> Komponenten bleiben erhalten, verändert sich aber</p>	<p><b>c. Lagerung</b> Komponenten verweilen ohne Veränderung an einem Ort</p> <p><b>d. Transport</b> Komponenten wechseln den Ort</p> <p><b>e. Kommissionierung</b> Zusammenstellung von mehreren Komponenten zu einer Einheit</p> <p><b>f. Vereinzeln</b> Auflösung einer Einheit zu mehreren Komponenten</p>

### 4.3 Herleitung der benötigten Parameter

Aufbauend auf den Definitionen der rückverfolgbaren Objekte und der Klassifizierung der Prozesse in der Fabrik werden die Parameter, die aufgenommen werden sollen, definiert. Dazu muss einerseits identifiziert werden, welche Daten für die Verfolgung der Trace-Objekte notwendig sind und andererseits festgelegt werden, welche Daten an den jeweiligen Prozessen, die im vorherigen Kapitel definiert wurden, aufgenommen werden müssen.

#### 4.3.1 Identifizierung der benötigten Datensätze der Trace-Objekte

Unabhängig davon, ob es sich bei den rückverfolgbaren Objekten um Einheiten oder individuelle Komponenten handelt, müssen über das Trace-Objekt eine Reihe von Daten mitgeschrieben werden. Am wichtigsten ist die eindeutige Identifizierungsnummer, die die Grundlage zur Erkennung ist. Neben ihr ist die Materialnummer wichtig, damit erkennbar ist, um welche Komponente in welchem Bearbeitungszustand es sich handelt. Bei der Rückverfolgung von Einheiten ist dementsprechend noch anzugeben, um wie viele Objekte es sich handelt, das heißt, wie groß die Einheit ist.

Damit das Objekt einem Auftrag zugeordnet werden kann muss es in dem Datensatz diesen vermerkt bekommen. Dies erfolgt natürlich nur wenn das Objekt bereits einem Auftrag zugeordnet wurde. Ob dies bereits erfolgt ist hängt davon ab, wo der Auftragsentkopplungspunkt liegt. Ziel der Verbindung des Objektes mit dem zugehörigen Auftrag ist, eine Aussage über den aktuellen Status zu erhalten. Dies ist jedoch nur möglich, wenn auch Daten über diesen vorliegen. Für die Ermittlung des aktuellen Zustands werden der aktuelle Prozess, der gerade durchlaufen wird, und der Anfangszeitpunkt, an dem der Prozess begonnen hat, aufgenommen. In welcher Form der Prozess aufgenommen werden sollte, wird im nächsten Abschnitt detailliert erläutert.

Nicht nur der aktuelle Status sondern auch Daten über den Werdegang sollen aufgezeichnet werden, denn nur so können einerseits Rückschlüsse aus qualitativen Aspekten als auch weitere Details wie Auslastungen oder Wartezeiten ermittelt werden. Für diesen Werdegang muss ein nahtloser Verlauf mit Hilfe von Anfangs- und Endzeitpunkten und den entsprechenden durchlaufenen Prozessen zu diesem Zeitpunkt angelegt werden. Sobald der aktuelle Status des Trace-Objekts sich ändert, wird er also direkt mit seinem Endzeitpunkt im Datensatz gespeichert.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die hierarchische Einordnung, denn nur wenn die enthaltenen Komponenten zu einem Trace-Objekt erfasst wurden, sind später detaillierte Aussagen, wie etwa die Gesamtdurchlaufzeit oder die Bearbeitungsstationen, möglich. Zu diesem Zweck wird zu jedem Objekt erfasst, aus welchen anderen Objekten es besteht. Dazu gehören nicht nur die Materialnummern der verbauten Komponenten, sondern auch die Identifikationsnummer, damit das genaue Trace-Objekt, das in ihm verbaut wurde, erkennbar ist. Wurde das Objekt selbst in ein anderes Objekt verbaut, so endet die Erfassung. Dies muss dann jedoch auch aus dem Datensatz zusammen mit der Komponente, in die es verbaut wurde, erkennbar sein. Im Datensatz wird dazu die Identifikationsnummer und die Materialnummer des entstandenen Objekts gespeichert.

In Tabelle 4-2 sind die benötigten Daten für die Identifizierung von einzelnen Artikeln in einem Datensatz zusammengefasst. Der Datensatz sieht für die Verfolgung von Einheiten anders aus, daher ergeben sich dementsprechend Abweichungen an den Feldern, die farblich hervorgehoben wurden. Dies betrifft die Anzahl der Objekte, die bei verfolgten Einheiten größer als eins ist. Außerdem werden statt der einzelnen Komponente, in die es verbaut wurde, alle Komponenten, in die eine Komponente dieser Charge verbaut wurde, in Form einer Liste vermerkt. Befindet sich das Objekt oder die Einheit auf einem Ladungsträger, so kann diese ebenfalls durch Angabe der ID vermerkt werden, daher existiert in Tabelle 4-2 zusätzlich das Feld mit der Bezeichnung Ladungsträger.

**Tabelle 4-2** Allgemeiner Datensatz für ein Trace-Objekt

<b>Datensatz zum Trace-Objekt</b>															
<b>Identifikationsnummer</b>															
<b>Materialnummer</b>															
<b>Auftragsnummer</b>															
<b>Anzahl der Objekte</b>															
<b>Aktueller Status</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Anfangszeitpunkt</th> <th colspan="2">Prozessdetails</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>			Anfangszeitpunkt	Prozessdetails										
Anfangszeitpunkt	Prozessdetails														
<b>Werdegang</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Anfangszeitpunkt</th> <th>Endzeitpunkt</th> <th colspan="2">Prozessdetails</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>			Anfangszeitpunkt	Endzeitpunkt	Prozessdetails									
Anfangszeitpunkt	Endzeitpunkt	Prozessdetails													
<b>Enthaltene Komponenten</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Identifikationsnummer</th> <th>Materialnummer</th> <th colspan="2">Details</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>			Identifikationsnummer	Materialnummer	Details									
Identifikationsnummer	Materialnummer	Details													
<b>Ist Komponente von</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Identifikationsnummer</th> <th>Materialnummer</th> <th colspan="2">Details</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>			Identifikationsnummer	Materialnummer	Details									
Identifikationsnummer	Materialnummer	Details													
<b>Ladungsträger</b>															

Um den Inhalt eines Ladungsträgers abzuspeichern und diesen dann über einen Weg zurückzuverfolgen gibt es den in Tabelle 4-3 dargestellten Datensatz. In ihm sind die enthaltenen Objekte und der aktuelle Status, also der derzeitige Ort und der Anfangszeitpunkt, vermerkt. Zusätzlich kann, falls dieser Ladungsträger sich auf einem anderen

Ladungsträger befindet, dieser zusätzlich angegeben werden. Innerhalb eines Prozesses können die Ladungsträger nicht verwendet werden, daher müssen die Objekte vor einem Prozess, wie der Bearbeitung und der Montagestation, entladen werden, weswegen das Prozessfeld in diesem Datensatz nicht vorhanden ist.

**Tabelle 4-3** Allgemeiner Datensatz für einen Ladungsträger

<b>Datensatz zum Ladungsträger</b>			
<b>Identifikationsnummer</b>			
<b>Aktueller Status</b>	Anfangszeitpunkt		Lagerort
<b>Enthaltene Komponenten</b>	Identifikationsnummer	Materialnummer	Details
<b>Ladungsträger</b>			

### 4.3.2 Datensätze der einzelnen Prozessbausteine

Entsprechend zu den in 4.2 definierten Prozessbausteinen werden hier die Daten, die an diesen Prozessen aufgenommen werden müssen, definiert. Das Feld Prozessdetails in Tabelle 4-2 aus Abschnitt 4.3.1 enthält jeweils einen der im Folgenden vorgestellten Datensätze (vergleiche Tabellen 4-4 bis 4-9), je nachdem welche Art von Prozess durchlaufen wird. Für jeden dieser Bausteine gilt, dass jeweils zu Beginn und zum Ende des jeweiligen Prozesses der Zeitpunkt aufgenommen werden muss, damit ein lückenloser Verlauf entsteht. Außerdem kann zusätzlich noch die Dauer, die der jeweilige Prozess benötigt hat, gespeichert werden. Diese ist zwar durch die Differenz der Anfangs- und Endzeitpunkte direkt ermittelbar, jedoch vereinfacht die getrennte Darstellung die Übersichtlichkeit. Durch sie ist dann beispielsweise direkt feststellbar, wenn der gleiche Prozess eine unterschiedliche Dauer benötigt hat, und es können im Anschluss Gründe dafür ermittelt werden. Ein weiteres Feld, welches in allen Prozessbausteinen vorhanden ist, kennzeichnet den zugehörigen Auftrag, falls das Objekt bereits einem Auftrag zugeordnet wurde.

Beim Prozessbaustein Bearbeitung müssen, zusätzlich zu diesen Daten, außerdem noch die Daten der Bearbeitungsstation und die des Trace-Objekts aufgenommen werden. Für die Darstellung des Zustands an der Bearbeitungsstation wird die besuchte Arbeitsstation identifiziert. Nicht im Fokus steht hierbei die Aufnahme der detaillierten Fertigungs- und Prozessparameter, da die Verkettung der Produktions- und Logistikprozesse verbessert werden soll. Jedoch ist eine Aufnahme dieser Parameter aus qualitativen Aspekten an dieser Stelle sinnvoll, da sie nur einen geringen Mehraufwand bedeutet. Dazu müssen am besten die aktuellen Einstellungen der Station in den Datensatz des Trace-Objekts übertragen werden. Werden bereits die restlichen Daten aufgenommen, bedeutet dies an dieser Stelle einen sehr geringen Aufwand, wenn die notwendige Unterstützung an den Maschinen vorliegt. Da diese jedoch in dieser Form nicht zum Konzept gehört, wird es in dem beispielhaften Datensatz in Tabelle 4-4 nicht im Detail dargestellt, sondern lediglich unter dem Feld Bearbeitungsparameter erwähnt und muss abhängig von der jeweiligen Maschine genauer spezifiziert werden.

Die zu dem jeweiligen Zeitpunkt beteiligten Mitarbeiter an der Station werden hier durch die Anzahl und das jeweilige Rollenprofil aufgenommen. An dieser Stelle könnten, wie bereits in Abschnitt 4.1.2 dargestellt, auch detaillierte Daten ermittelt werden, dies wird hier jedoch nicht betrachtet, sondern lediglich unter dem Feld Details zusammengefasst. Aus der Anzahl der Mitarbeiter ergibt sich dann eine Vorgabezeit für die Bearbeitung, welche im Feld „Bearbeitungszeit“ dargestellt wird. Ein Vergleich mit der tatsächlichen Dauer kann dann Probleme in der Bearbeitung oder falsche Vorgabezeiten deutlich machen.

Neben den Daten über die Bearbeitung gehören auch die Daten, die die Veränderung des Trace-Objektes beschreiben, in den Datensatz. Sowohl die Materialnummer vor der Bearbeitung als auch nach der Bearbeitung müssen gespeichert werden. Außerdem müssen die Identifikationsnummer und die Losnummer (falls eine Bearbeitung in Losen vorliegt) aufgenommen werden.

**Tabelle 4-4** Datensatz des Prozessbausteins Bearbeitung

<b>Bearbeitung</b>			
Anfangszeitpunkt:		Endzeitpunkt:	
Dauer:		Auftrag:	
Arbeitsstation:			
Bearbeitungsparameter:			
Mitarbeiter:	Anzahl:	Rollenprofil:	Details:
Bearbeitungszeit:			
Identifikationsnummer:		Losnummer:	
Alte Materialnummer:		Neue Materialnummer:	

Die Daten, die zu einem Montageprozess gesammelt werden, unterscheiden sich nur geringfügig von denen des Bearbeitungsprozesses. Sie sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst. Bei der Montage fehlt jedoch der Punkt Bearbeitungsparameter und statt der Veränderung der Materialnummer werden die verbauten Komponenten aufgenommen. Dazu werden sowohl die Anzahl und die Materialnummer der jeweiligen Komponenten als auch die eindeutige Identifikationsnummer gespeichert. Dies ermöglicht später die eindeutige Rückverfolgung, welches Objekt in welchem Bauteil verbaut wurde. Für die Teile, die in Einheiten verfolgt werden, wird anstatt der Identifikationsnummer des Objekts die der Einheit vermerkt. Neben der neuen Materialnummer der aus der Montage ausgehenden Komponenten muss zusätzlich eine neue Identifikationsnummer vermerkt werden.

**Tabelle 4-5** Datensatz des Prozessbausteins Montage

<b>Montage</b>			
Anfangszeitpunkt:		Endzeitpunkt:	
Dauer:		Auftrag:	
Arbeitsstation:			
Mitarbeiter:	Anzahl:	Rollenprofil:	Details:
Identifikationsnummer:		Losnummer:	
Verbaute Komponenten:	Anzahl:	Materialnummer:	Identifikationsnummer:
Neue Materialnummer:			
Neue Identifikationsnummer:			

Die weiteren Prozessbausteine beziehen sich auf Logistikprozesse und benötigen dementsprechend keine Felder, die eine Veränderung des Zustands des Objekts beschreiben. Bei der Lagerung wird statt der Arbeitsstation der Lagerort angegeben und zusätzlich ist auch das Feld „Ladungsträger“ vorhanden, da die Objekte auf einem Ladungsträger gelagert werden können. Ansonsten enthält es die bereits für die Montage und Bearbeitung beschriebenen Felder, wie in Tabelle 4-6 erkennbar ist.

**Tabelle 4-6** Datensatz des Prozessbausteins Lagerung

<b>Lagerung</b>			
Anfangszeitpunkt:		Endzeitpunkt:	
Dauer:		Auftrag:	
Lagerort			
Mitarbeiter:	Anzahl:	Rollenprofil:	Details:

Identifikationsnummer:		Losnummer:	
Materialnummer:			
Ladungsträger:			

Der Prozessbaustein Transport unterscheidet sich nur geringfügig von dem für die Lagerung. Statt einem Lagerort werden sowohl der Anfangsort als auch der Zielort aufgenommen. Der vollständige Datensatz ist in Tabelle 4-7 dargestellt.

**Tabelle 4-7** Datensatz des Prozessbausteins Transport

<b>Transport</b>			
Anfangszeitpunkt:		Endzeitpunkt:	
Dauer:		Auftrag:	
Ursprungsort:		Zielort:	
Mitarbeiter:	Anzahl:	Rollenprofil:	Details:
Identifikationsnummer:		Losnummer:	
Materialnummer:			
Ladungsträger:			

Der Baustein Kommissionierung ähnelt dem der Montage, da die kommissionierten Komponenten mit deren Anzahl, der Materialnummer und deren Identifikationsnummer aufgenommen werden müssen. Bei einer einfachen sortenreinen Zusammenstellung auf einem Ladungsträger vereinfacht sich der Datensatz entsprechend, da nur eine Materialart aufgenommen wird. Da sie auf einem Ladungsträger zusammengestellt werden, wird auch der verwendete Ladungsträger aufgenommen.

**Tabelle 4-8** Datensatz des Prozessbausteins Kommissionierung

<b>Kommissionierung</b>			
Anfangszeitpunkt:		Endzeitpunkt:	
Dauer:		Auftrag:	
Ort:			
Mitarbeiter:	Anzahl:	Rollenprofil:	Details:
Identifikationsnummer:		Losnummer:	
Kommissionierte Komponenten:	Anzahl:	Materialnummer:	Identifikationsnummer:
Ladungsträger:			

Der Prozessbaustein Vereinzeln ist fast identisch mit dem der Kommissionierung. Die Komponenten, die auf einem Ladungsträger zusammengefasst wurden, werden nun wieder voneinander unabhängig betrachtet. Da sie nicht mehr auf einem Ladungsträger liegen, entfällt bei diesem Datensatz, wie in Tabelle 4-9 dargestellt, das Feld für den Ladungsträger.

**Tabelle 4-9** Datensatz des Prozessbausteins Vereinzeln

Vereinzeln			
Anfangszeitpunkt:		Endzeitpunkt:	
Dauer:		Auftrag:	
Ort:			
Mitarbeiter:	Anzahl:	Rollenprofil:	Details:
Identifikationsnummer:		Losnummer:	
Vereinzelte Komponenten:	Anzahl:	Materialnummer:	Identifikationsnummer:

#### 4.4 Auswahl einer geeigneten Identifizierungstechnik

Im Anschluss an die Definition der Daten, Objekte und Prozessbausteine muss ermittelt werden, auf welche Art und Weise diese Daten aufgenommen werden sollen und wie sie zu verarbeiten sind. Dazu gehört die Auswahl der Technik, die zur Identifizierung der Objekte gewählt wird, wozu als erstes eine Entscheidung über die Art der Datenhaltung getroffen werden muss. Die Parameter, die durch das System aufgenommen werden sollen, sind prinzipiell so beschrieben, dass sie sowohl dezentral am Objekt, als auch zentral in einem System abgespeichert werden können. Damit das Simulationsmodell auf die Daten zu jedem beliebigen Zeitpunkt zugreifen kann, eignet sich jedoch nur die zentrale Verwaltung der Daten, da bei einer dezentralen Datenhaltung der Aufruf der aktuellen Situation nicht möglich ist. Eine Identifizierung der Objekte mit Hilfe von „intelligenten“ Objekten, die ihre Daten selbst verwalten, ist daher nicht sinnvoll.

Stattdessen werden die Objekte mit einer eindeutigen Kennzeichnung versehen. Mit einem entsprechenden Lesegerät kann dann das Objekt identifiziert und auf die zugehörigen Informationen zugegriffen werden. Das verwendete Nummernsystem sollte einem der in Abschnitt 2.2.5 vorgestellten, international eindeutigen System entsprechen, damit die Ausweitung des Traceabilitysystems auch standortübergreifend möglich ist und genügend eindeutige Nummern für die Vielzahl an Objekten im System gewährleistet werden.

Wie bereits deutlich wurde muss bei jedem Prozess sowohl am Anfang als auch am Ende eine Datenaufnahme erfolgen, sodass ein lückenloser Verlauf aufgenommen wird. Damit der Aufwand dieser Aufnahmen so gering wie möglich gehalten und der Arbeitsfluss nicht unterbrochen wird, muss daher individuell für die Prozesse und auch für die unterschiedlichen Arten von Trace-Objekten die Identifizierungstechnik und die Art der Datenaufnahme definiert werden.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.5 dargestellt, sind für solche Anwendungen die beiden geeignetsten Identifizierungstechniken Barcode und RFID-Systeme. Für die Wahl von Barcodes spricht, dass sie geringe Kosten pro zu identifizierendem Objekt bzw. Einheit verursachen. Dies ist insbesondere wichtig da alle Komponenten, die in ein Produkt eingehen, entweder einzeln oder aber in Einheiten, rückverfolgt werden und so eine Vielzahl von Objekten gekennzeichnet werden muss. Jedoch können sie nur bei Sichtkontakt gelesen werden und verursachen damit einen großen Aufwand bei den Mitarbeitern, wenn jedes der Vielzahl an Trace-Objekten an jedem Punkt aufgenommen werden muss. Die RFID-Technik hingegen ist in der Handhabung wesentlich weniger aufwendig, da sie eine sofortige Identifizierung ohne direkte Sichtverbindung, mit größeren Abständen ermöglicht und wiederbeschreibbar ist. In diesem Anwendungsfall nachteilig ist allerdings, dass die Kosten für die Integration und Hardware höher sind, als bei der Barcodetechnik, was bei der Menge an verwendeten Tags einen hohen Einfluss hat. Um die Vorteile beider Techniken auszunutzen, wird daher eine Vermischung beider Techniken vorgeschlagen. Für die Hauptkomponenten sollen Barcodes verwendet werden, wohingegen die Hilfskomponenten mit Hilfe von wiederbeschreibbaren RFID-Tags identifiziert werden.

Dies begründet sich dadurch, dass die Hilfskomponenten, wie bereits in Abschnitt 4.1.1 erläutert, bevorzugt in Behältern rückverfolgt werden sollen. Wird dazu ein entsprechendes Behältermanagement mit einem Behälterkreislauf eingeführt, so reicht die einmalige Anschaffung der RFID-Tags, die an diesen Behältern angebracht werden. Dazu müssen sowohl die zählbaren als auch nicht zählbaren Hilfskomponenten mit einem entsprechenden Behälter die Produktion durchlaufen. Die mit dem Behälter verknüpften RFID-Tags können dann jeweils beim Befüllen der Behälter wieder beschrieben werden. Werden sie an eine jeweilige Station gebracht, so kann eine automatische Identifizierung ohne einen manuellen Einfluss erfolgen. Somit ist diese Identifizierungsart sowohl aus Kosten- als auch aus Aufwandssicht angebracht.

Die Hauptkomponenten sollen zwar einzeln zurückverfolgt werden, können dabei jedoch auch mit mehreren Komponenten auf demselben Ladungsträger liegen. Um eine Verwechslung von unterschiedlichen Objekten zu vermeiden, ist daher die Identifizierung der Ladungsträger mit RFID-Tags nicht sinnvoll. Gegen die Wahl von RFID-Tags an den einzelnen Hauptkomponenten spricht, dass sie entweder am Ende, nachdem das

Endprodukt entstanden ist, an der jeweiligen Komponente verweilen oder aber von ihr entfernt werden müssen. Somit ist es in jedem Fall kostenintensiv, da die RFID-Tags entweder nicht wiederverwendet werden oder ein Mehraufwand durch das Entfernen der Tags entsteht. An dieser Stelle ist also die bevorzugte Methode eine Barcodetechnik, bei der preiswert Aufkleber an die Komponente geklebt werden können. Um sicherzustellen, dass genug Speicherplatz auf diesen vorhanden ist, eignet sich die Wahl von zweidimensionalen Barcodes. Durch den höheren Speicherplatz auf einem zweidimensionalen Barcode wird gewährleistet, dass keine Einschränkungen in der Wahl des Nummernsystems oder der Anzahl der zu identifizierenden Objekte bestehen.

Barcodes können, wenn sie bei einem Bearbeitungsprozess zerstört oder entfernt werden müssen, direkt und kostengünstig neu gedruckt und geklebt werden. Der höhere Aufwand beim Einlesevorgang kann in diesem Fall durch eine gute Wahl des Punktes, an dem der Code platziert wird, und ein entsprechend ausgerichtetes Kamerasystem kompensiert werden. So können im Idealfall die Hauptkomponenten direkt bei der Zuführung zu der jeweiligen Arbeitsstation eingelesen werden.

Um das Endprodukt für die gesamte Lebensdauer identifizieren zu können, sollte eine Identifizierungstechnik verwendet werden, die eine entsprechend lange Lebensdauer besitzt. Dafür eignen sich RFID-Tags oder aber, falls dies in die weiteren Prozesse (wie Lackieren oder Beschichten) integrierbar ist, die Verwendung eines permanenten Barcodes. Dazu sollte eine entsprechende Hauptkomponente, wie etwa das Gehäuse, ausgewählt werden, welche dann den Barcode nicht aufgeklebt, sondern beispielsweise lackiert oder eingelasert bekommt.

Die so gewonnenen Daten werden, wie bereits in Abschnitt 3.2 dargestellt, durch ein geeignetes MES verwaltet. Wie genau dieses System aussieht wird an dieser Stelle nicht ausgeführt, wichtig ist jedoch, dass in Echtzeit Daten geliefert werden können und eine Datenbank vorhanden ist. Mit dieser Datenbank können dann Statistiken zu den Prozessen erstellt werden, mit deren Hilfe die Vorgabedaten verbessert werden können. Zusätzlich besitzt dieses System eine passende Schnittstelle, die einen einfachen Zugriff durch das Simulationsprogramm auf die Daten ermöglicht.

## 5 Entwicklung des Simulationsmodells

In diesem Kapitel wird ein Konzept entwickelt, welches in der Lage ist, mit Hilfe von ereignisdiskreter Simulation den Ressourcenverbrauch in einer Produktion nachzuerfolgen und zu prognostizieren. Diese Nachverfolgung und Prognose dient dazu, Schwachstellen in der Verknüpfung der Logistik- und Produktionsprozesse zu identifizieren. Außerdem kann sie dazu verwendet werden, Verbesserungsvorschläge zu erarbeiten, welche dann auf ihre Eignung erprobt werden und dadurch eine Optimierung der Produktion erzielen.

Um das Konzept umzusetzen wird das Simulationswerkzeug Tecnomatrix® Plant Simulation der Firma Siemens PLM Software gewählt, da es die in Kapitel 3 aufgeführten Anforderungen erfüllt. Das vorgestellte Konzept ist nicht auf die Anwendung mit diesem Simulationswerkzeug beschränkt, sondern kann auch mit anderen ereignisdiskreten Simulationssprachen umgesetzt werden. Für die Verwendung von Plant Simulation spricht allerdings, dass es einen guten Kompromiss zwischen dem Anwendungsbezug und der Allgemeingültigkeit besitzt (Eley 2012, S. 11). Es ist eines der gängigsten Modellierungswerkzeuge und wurde ursprünglich am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) entwickelt. Mit diesem Werkzeug können objektorientierte Modelle mit einer Vererbungshierarchie erstellt werden. Außerdem unterstützt es viele verschiedene Schnittstellen und ermöglicht eine Reihe von Analysen. Zusätzlich können durch die Programmiersprache Simtalk vordefinierte Bausteine einfach abgewandelt und an Anforderungen angepasst werden (Siemens PLM Software 2014).

Für die Entwicklung des Simulationsmodells wird angelehnt an das in Kapitel 2.3.3 erläuterte Vorgehensmodell verfahren. Daher erfolgt eine Verifikation und Validierung im Anschluss an jede Phase. Dabei sind gewisse Phasen oder Aspekte bereits durch das Traceabilitysystem oder die Anforderungsdefinition in Kapitel 3 erarbeitet worden und werden daher nur noch zusammenfassend beschrieben. Insgesamt wird eine allgemein gehaltene Beschreibung gewählt. Erst bei der Formalisierung bzw. der Implementierung des Modells erfolgt die Darstellung angepasst an das ausgewählte Werkzeug Plant Simulation.

## 5.1 Verifikation und Validierung der Aufgabendefinition

Die Ziele, die mit dem Konzept erreicht werden sollen, wurden bereits in der Einleitung dieser Arbeit detailliert beschrieben. Des Weiteren wurde in der Anforderungsdefinition im dritten Kapitel bereits auf die Anforderungen, die an die Simulation gestellt werden, eingegangen. Diese beschreiben auch die Aufgaben, die durch das Simulationsmodell erfüllt werden sollen. Somit sind an diesem Punkt die Zielbeschreibung und die Aufgabendefinition bereits erfolgt. Da jedoch angelehnt an das in Abschnitt 2.3.3 vorgestellte Vorgehensmodell vorgegangen wird, müssen die Ergebnisse dieser Phasen noch verifiziert und validiert werden. Dies soll durch das strukturierte Durchgehen erfolgen, weswegen an dieser Stelle die Ziele und Anforderungen noch einmal übersichtlich zusammengefasst und auf ihre Plausibilität geprüft werden. Dieses strukturierte Durchgehen der Ziele und Aufgaben kann anhand von Tabelle 5-1 nachvollzogen werden. Die in der ersten Spalte beschriebenen Ziele und Aufgaben werden durch das im vierten Kapitel vorgestellte Traceabilitysystem gewährleistet und sind hier nur zur Vollständigkeit und um den Zusammenhang erkenntlich zu machen, aufgeführt.

**Tabelle 5-1** Ergebnisse des strukturierten Durchgehens der Anforderungen und Zielvorstellungen

Funktionen/Aufgaben	Ziele	Plausibilität
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufnahme und Speicherung der Traceabilitydaten               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkttraceability</li> <li>• Prozesstraceability</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datenbasis ermöglicht neue Erkenntnisse               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserung der Vorgabewerte</li> <li>• Bessere Planungsgenauigkeit</li> </ul> </li> <li>• Verbesserung der Qualität               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Produkte sind mit welchen Parametern eingegangen?</li> <li>• Identifizierung von Qualitätsproblemen</li> </ul> </li> </ul>	✓
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übertragung der Daten des aktuellen Zustands (aus Traceabilitysystem) in Simulationsmodell</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realer Zustand in der Fabrik kann analysiert werden</li> <li>• Direkte Schlussfolgerungen sind möglich</li> </ul>	✓
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abbildung der Vorgänge in der Produktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• besseres Systemverständnis</li> <li>• Schwachstellen werden deutlich</li> </ul>	✓
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prognose wann sich welches Objekt wo in der Fabrik befindet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bessere Planung der Ressourcen</li> <li>• Besserer Informationsfluss zum Kunden</li> <li>• Ermöglichung von Visualisierung in Echtzeit über Linienfortschritt               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mitarbeiter können sich Arbeit besser einteilen</li> </ul> </li> </ul>	✓

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variationsmöglichkeiten über Experimente bspw.             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Veränderung der Mitarbeiterzahl</li> <li>• Änderung der Auftragsreihenfolge</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besseres Systemverständnis             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Änderung bedingt was?</li> <li>• Was muss angepasst werden um Zielzustand zu erreichen?</li> </ul> </li> <li>• Findung/Erreichung eines optimalen Zustands</li> </ul>	✓
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswertung der Experimente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierungen/Verbesserungen an der Fabrik werden ermöglicht</li> <li>• Zeit- und Kosteneinsparungen werden gewährleistet</li> </ul>	✓

## 5.2 Systemanalyse

Bevor eine Modellierung des Systems erfolgen kann, muss das darzustellende System analysiert und vereinfacht werden. Dazu wird aus dem realen System ein Modell mit allen notwendigen Elementen abgeleitet. Im Anschluss wird deren Zusammenwirken, also deren Aufbau- und Ablaufstruktur, entwickelt. Wie die Daten aus dem realen System also dem Traceabilitysystem in das Modell integriert und verarbeitet werden, wird anschließend dargestellt. Dazu wird die Schnittstelle des modellierten Systems zur Umwelt mit den Eingangs- und Ausgangsgrößen beschrieben.

### 5.2.1 Definition der Modellelemente

Um das reale System durch ein Simulationsmodell abzubilden, müssen dessen wesentliche Elemente identifiziert werden. Dieser Schritt ist zu großen Teilen bereits in Kapitel 4 bei der Entwicklung des Traceabilitysystems erfolgt, in dem die Objekte und die Prozessbausteine definiert wurden. Damit das Simulationsmodell kompatibel zu dem entwickelten Traceabilitysystem ist, wird die Simulation, aufbauend auf diesen in Abschnitt 4.1 und 4.2 definierten Elementen, entwickelt und um weitere zusätzlich notwendige Elemente erweitert.

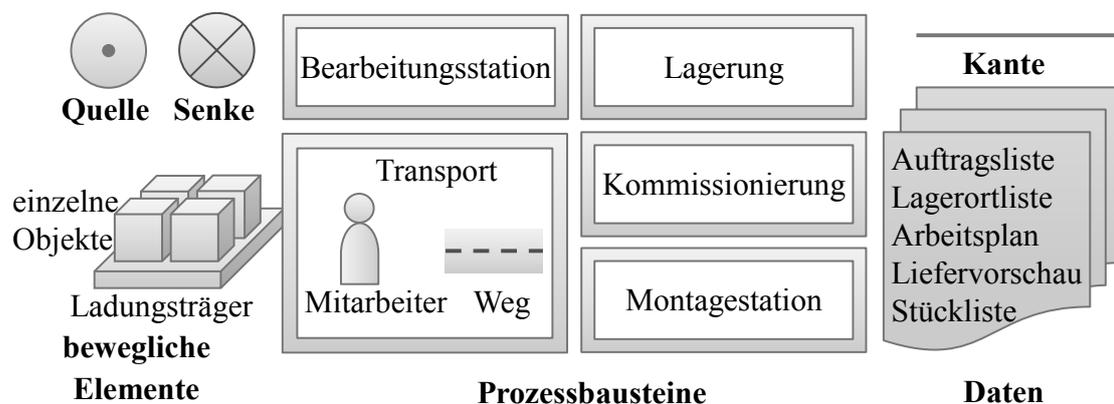
Die wichtigsten Elemente, die innerhalb der Simulation dargestellt werden müssen, sind die rückverfolgbaren Objekte, die die Produktion durchlaufen. Wie in Abschnitt 4.1 dargestellt, können dies sowohl einzelne Objekte, als auch Ladungsträger mit mehreren Objekten sein. Diese beiden Objektarten müssen daher auch mit dem Modell abgebildet werden können, sie werden im Folgenden zusammenfassend als bewegliche Elemente bezeichnet.

Zusätzlich müssen die einzelnen Prozesse, die von den Objekten durchlaufen werden, durch das Modell abgebildet werden. Die wesentlichen Prozesse, die in einer Produktion, wie sie in Abschnitt 3.1 definiert wurde, vorhanden sind, wurden bereits in Abschnitt 4.2 identifiziert und dargestellt. Insgesamt sind es sechs verschiedene Prozessbausteine - die Bearbeitungsstation, die Montagestation, der Transport, die Lagerung,

die Kommissionierung und die Vereinzelung – mit denen sich eine Fabrik darstellen lässt. Für die Darstellung im Simulationsmodell werden diese Bausteine auf insgesamt fünf eingegrenzt, da die Vereinzelung nicht abgebildet wird. Dies liegt daran, dass in der Simulation davon ausgegangen wird, dass die Elemente, die einmal kommissioniert wurden, direkt verbaut werden und zwischendurch nicht wieder vereinzelt werden müssen. Die Zusammenstellung und Auflösung von Objekten auf einem Ladungsträger wird, um die Komplexität zu reduzieren, in diesem Simulationsmodell nicht dargestellt. Mit dem Baustein Kommissionierung wird demnach, anders als in Abschnitt 4.2 beschrieben, also lediglich das reine Kommissionieren abgebildet.

Der Baustein Transport ist im eigentlichen Sinn kein Baustein, sondern setzt sich aus den Elementen Mitarbeiter und Weg zusammen. Die Mitarbeiter besitzen eine entsprechende Kapazität und können die beweglichen Elemente über die Wege transportieren. Für direkte Weitergaben, wie sie in Abschnitt 4.2 definiert werden, werden zudem auch noch Elemente benötigt, die die Verbindung zwischen unterschiedlichen Prozessbausteinen darstellen. Diese Elemente werden als Kanten bezeichnet und besitzen keine Weglänge, sondern stellen nur die Verbindung zu benachbarten Prozessen vereinfacht dar.

Da das zu simulierende System, anders als die Realität, nur einen begrenzten Bereich abbildet und demnach an einem Punkt anfängt und an einem Punkt endet, müssen außerdem die Schnittstellen des Systems dargestellt werden können. Dazu dienen die beiden zusätzlichen Bausteine Quelle und Senke. Die Quelle stellt den Punkt dar, an dem die Objekte und Ladungsträger in das Modell kommen und auf die weiteren Bausteine verteilt werden. Haben diese dann die Produktion durchlaufen, werden sie von der Senke aus dem System geschleust, verlassen also das System. Die einzelnen Bausteine und Elemente, die im Simulationsmodell verwendet werden, sind in Abbildung 5-1 skizziert.



**Abbildung 5-1** Übersicht der Elemente und Bausteine des Simulationsmodells

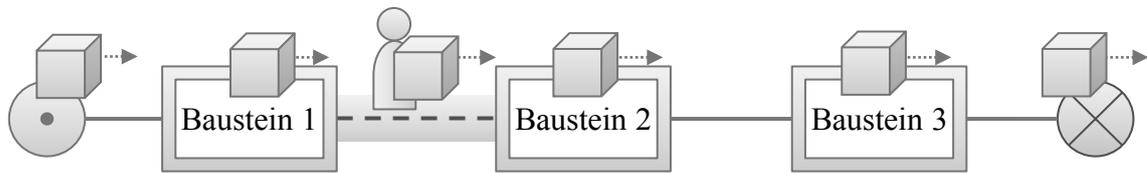
In Abschnitt 4.1.1 wurde zudem der Auftrag als ein wichtiges Objekt identifiziert. Auch für die Simulation ist er grundlegend, denn ohne Vorgabe, welche Teile in welcher Anzahl und welcher Reihenfolge produziert werden sollen, kann keine sinnvolle Simulation durchgeführt werden. Damit die Elemente an den richtigen Lagerort transportiert werden und von der richtigen Stelle entnommen werden können, muss im Simulationsmodell außerdem eine Liste vorhanden sein, in der vermerkt ist, an welchem Ort welches Material liegt. Diese Liste wird im weiteren Verlauf als Lagerortliste bezeichnet. Um die entsprechenden Bearbeitungsparameter, wie die Bearbeitungszeiten der einzelnen Stationen für jede Komponente, aufrufen zu können, muss es außerdem einen Arbeitsplan geben, der für jede Maschine jedes zu fertigende Element mit dessen Daten enthält. In diesem sind dann, neben den Bearbeitungsparametern, auch die Arbeitsstationen, die die beweglichen Elemente als nächstes zu durchlaufen haben, gespeichert. Um die Montage und Kommissionierung simulieren zu können, wird außerdem eine Stückliste benötigt. In dieser Liste müssen zu jeder Endkomponente die entsprechenden zu kommissionierenden bzw. zu verbauenden Komponenten in der entsprechenden Menge aufgeführt sein. Damit die Quelle Teile entsprechend der voraussichtlichen Vorgänge im Wareneingang abbilden kann, wird außerdem eine Liefervorschau benötigt. Diese enthält eine Liste der Komponenten, die im Wareneingang in dem simulierten Zeitraum voraussichtlich angeliefert werden. Diese fünf verschiedenen Datentypen, die zur Simulation benötigt werden, sind ebenfalls in Abbildung 5-1 aufgeführt.

Zur Steuerung der Simulation gibt es außerdem noch Methoden, die bei dem Eintreten von Ereignissen ausgeführt werden und Ereignisse oder auch Aktivitäten ausführen. Um die durch sie aufgerufenen Ereignisse in der richtigen Reihenfolge abzuarbeiten, wird auf einen Ereignisverwalter zurückgegriffen, der die Ereignisse entsprechend der Zeit, die sie verbrauchen, abarbeitet und neue Ereignisse entsprechend hinzufügt. Für die Auswertung der Simulation müssen Statistiken zu den einzelnen Bausteinen aufgenommen werden können. Diese Statistiken sollen beispielsweise aufzeichnen, zu welchem Anteil der Zeit die Bausteine arbeiten oder wie lange sie auf Elemente warten.

### **5.2.2 Beschreibung der Ablauf- und Aufbaustruktur**

Die beweglichen Elemente, die durch das Simulationsmodell laufen und die rückverfolgbaren Objekte abbilden, lassen sich unterscheiden in Ladungsträger und einzelne Objekte. Die Ladungsträger unterscheiden sich im Simulationsmodell nur dadurch von den Elementen, dass sie mehrere Objekte transportieren und diese zusammenfassen. Sie können aber ansonsten genauso wie die einzelnen Objekte verwendet werden. Insgesamt durchlaufen die beweglichen Elemente das Simulationsmodell von der Quelle bis zur Senke und werden dazwischen von den unterschiedlichen Prozessbausteinen verändert. Um von einem Baustein zum nächsten zu gelangen, werden sie entweder über einen Mitarbeiter über einen Weg getragen (vergleiche den Baustein Transport) oder aber

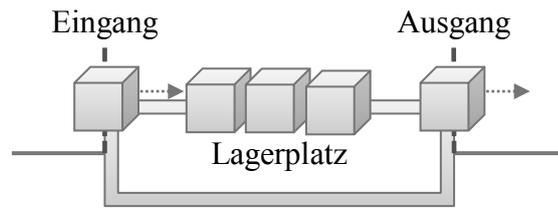
über Kanten weitergereicht. Die Kanten transportieren lediglich die Elemente und verbrauchen weder Zeit noch verändern sie die Daten an den Elementen. Dieser Ablauf ist schematisch in Abbildung 5-2 dargestellt.



**Abbildung 5-2** Schematische Ablaufstruktur

Die beweglichen Elemente besitzen kein Verhalten, können aber von anderen Bausteinen verändert und transportiert werden. Um diese Veränderungen aufzuzeichnen, besitzen sie eine Reihe von Attributen. Dies können zum Beispiel die Artikelnummer des Elements, eine Liste der enthaltenen Komponenten oder auch eine Liste mit der Historie der durchlaufenen Bausteine und den entsprechenden Zeitpunkten sein. Für die Historie werden beispielsweise jeweils bei Eingang in einen Baustein und bei Ausgang aus dem Baustein der Zeitpunkt sowie die aktuellen Daten des Elements gespeichert. So entstehen, analog zu den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Traceabilitydatensätzen, individuelle Datensätze für jedes einzelne bewegliche Element.

Da das Modell eine Produktion vom Wareneingang bis zum Warenausgang abbilden soll (vgl. Abschnitt 3.1), stellt die Quelle die im Wareneingang angelieferten Elemente entsprechend der Liefervorschau dar. Die beweglichen Elemente werden von der Quelle, analog zu den im Wareneingang angelieferten Komponenten, in notwendiger Anzahl und Art, erzeugt. Die Senke ist dann das Abbild vom Warenausgang, in dem die Elemente aus dem Modell abgezogen werden. Sowohl Quelle als auch Senke verändern den Werdegang der beweglichen Elemente nicht, da sie nur die Schnittstellen zur Systemgrenze sind und in der realen Produktion nicht existieren. Die Quelle legt den Datensatz für die beweglichen Elemente an und ermittelt mit Hilfe des Arbeitsplans den nächsten Zielort. Dazu wird neben der Materialnummer auch die Materialnummer des zu entstehenden Endprodukts benötigt. Die Senke führt keinerlei Veränderungen an den Elementen durch. Sie dient dazu, alle Datensätze, die das Element enthält, abzuspeichern und das Element im Anschluss zu vernichten. Bei den anderen Bausteinen wird, wie in Abbildung 5-3 anhand eines Lagerplatzes dargestellt, jeweils am Eingang und am Ausgang des Bausteins die Historie beschrieben. Außerdem wird bei allen Bausteinen eine Statistik mitgeschrieben, die den Anteil, an dem sich Elemente auf ihnen befinden, speichert.



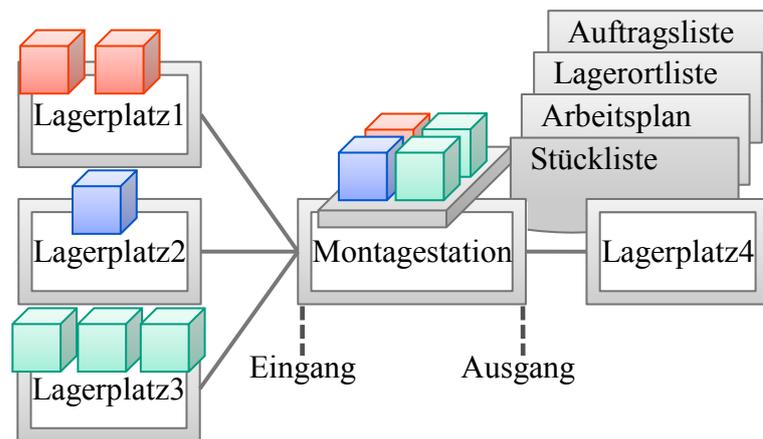
**Abbildung 5-3** Schematische Darstellung der Lagerung

Die *Lagerung* (in Abbildung 5-3 dargestellt) wird für das Simulationsmodell durch einzelne Lagerplätze abgebildet. Diese funktionieren nach dem FIFO-Prinzip (engl. first in - first out), das heißt, dass Objekte in der gleichen Reihenfolge entnommen werden, wie sie abgeladen wurden. Dementsprechend kann entweder nur eine sortenreine Belegung erfolgen, oder aber die entsprechende Reihenfolge der Elemente muss bei der Entnahme beibehalten werden. Dies kann zum Beispiel bei der Bereitstellung der Elemente an einer Bearbeitungsstation sinnvoll sein, wenn diese in derselben Reihenfolge wie sie angeliefert werden auch bearbeitet werden sollen. Da an den Lagerplätzen keine Veränderung der Elemente erfolgt, werden sie lediglich durch eine Kapazität dargestellt und besitzen ansonsten keine Attribute.

Die *Bearbeitungsstation* ist ein Prozessbaustein, der, im Gegensatz zu der Lagerung nicht nur die Zeitdauer und den Ort speichert, sondern auch eine Veränderung des Elements (in Form einer Änderung der Materialnummer) abbildet. Abhängig von den zu bearbeitenden Objekten und den dazugehörigen Zeiten, verweilen die Objekte eine gewisse Dauer auf dem Baustein. Dazu werden die entsprechenden Bearbeitungsparameter wie Bearbeitungs- oder Rüstzeiten im Arbeitsplan ermittelt. Die Mitarbeiter an den Stationen werden nicht im Detail abgebildet, da davon ausgegangen wird, dass die Stationen durch Mitarbeiter besetzt sind, welche nur an dieser Station arbeiten und nicht gleichzeitig auch noch für andere zuständig sind. Demnach werden der Schichtplan bzw. Pausenzeiten mit in die Verfügbarkeit der Stationen aufgenommen. Da die Anzahl der Mitarbeiter an den Stationen in manchen Fällen einen Einfluss auf die Dauer der Rüstung und der Bearbeitung hat, wird diese durch ein Attribut dargestellt. Dafür muss eine entsprechende Formel, die den Einfluss der Anzahl der Mitarbeiter auf die Rüst- und Bearbeitungszeiten angibt, hinterlegt sein. Die Bearbeitungsstation führt, genau wie die anderen Bausteine, sowohl beim Eingang in den Baustein als auch beim Ausgang Veränderungen an den beweglichen Elementen durch und speichert die Vorgänge an der Station.

Die *Montagestation* hat die gleichen Funktionen wie die Bearbeitungsstation, denn sowohl die Zeitdauer der Bearbeitung als auch die Mitbeeinflüsse müssen abgebildet werden. Die Mitarbeiter werden an diesem Baustein auch lediglich durch das Attribut Anzahl der Mitarbeiter und der generellen Verfügbarkeit der Station abgebildet. Der Einfluss auf die Zeitdauer in der Montage wird ebenfalls mit Hilfe des Arbeitsplans

ermittelt und unter Berücksichtigung der Mitarbeiteranzahl abgebildet. Ein wesentlicher Unterschied zu der Bearbeitungsstation ist jedoch, dass aus mehreren Elementen ein neues Element entsteht. Um die benötigten Elemente zu ermitteln, werden an dieser Stelle die Auftragsliste, die Lagerortliste und die Stückliste benötigt. Die Auftragsliste wird der Reihenfolge nach durchgegangen und die für den Auftrag benötigten Elemente werden mit Hilfe der Stückliste identifiziert. Durch die Lagerortliste wird der Lagerort, von dem sie entnommen werden, ermittelt.

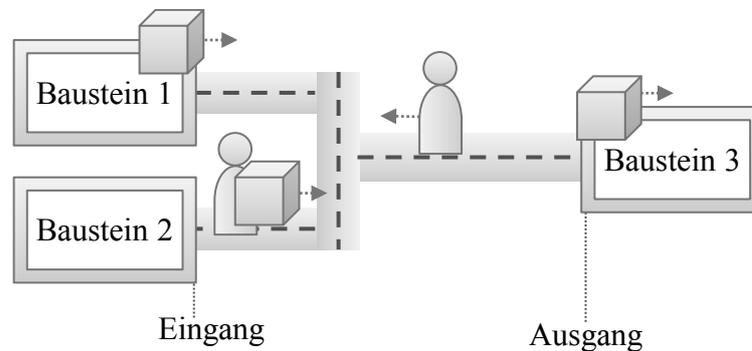


**Abbildung 5-4** Schematische Darstellung der Montage

Eine Darstellungsmöglichkeit für die Montage der einzelnen Elemente wäre, dass die eingehenden Elemente vernichtet werden und stattdessen neue ausgehende Elemente erzeugt werden. Zur Vereinfachung und um die Übersicht über die verbauten Komponenten zu behalten, wird hier jedoch eine andere Art der Darstellung, das Beladen eines Ladungsträgers mit den verwendeten Komponenten, gewählt. Dieser Vorgang ist in Abbildung 5-4 schematisch dargestellt. Der Ladungsträger repräsentiert das montierte Objekt und enthält alle Objekte, aus denen es zusammengesetzt wurde. Die Daten der in ihm enthaltenen Objekte bleiben erhalten und können nach wie vor ausgelesen oder verändert werden. Im weiteren Verlauf der Simulation wird der Ladungsträger genauso verwendet, wie die anderen beweglichen Elemente, das heißt Bausteine können Zeitstempel und andere Daten hinterlegen.

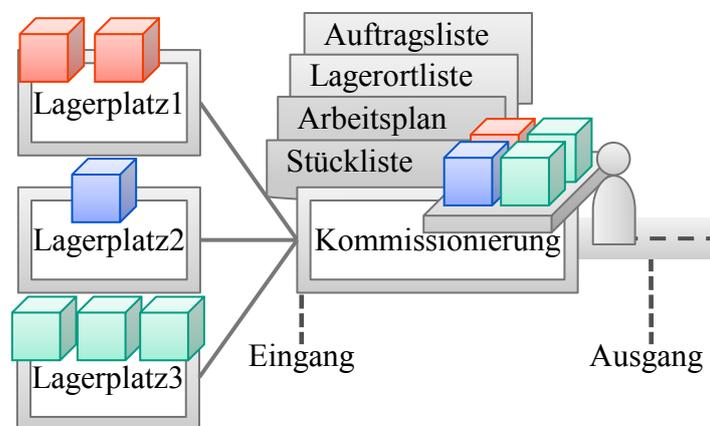
Der *Transport*, der kein richtiger Prozessbaustein ist, setzt sich aus den Elementen Mitarbeiter und Weg, wie in Abbildung 5-5 dargestellt, zusammen. Wenn ein bewegliches Element den Ausgang des Bausteins erreicht, wird ein Mitarbeiter angefordert, der das Element abtransportiert. Ein Mitarbeiter kann, abhängig von seiner Kapazität, Elemente von einem Baustein zum nächsten transportieren. Dabei ist die Transportdauer abhängig von der Geschwindigkeit des Mitarbeiters und der Länge des Weges sowie der Auf- und Abladedauer. Außerdem besitzen die Mitarbeiter einen Schichtplan entsprechend zu der Dauer, in der sie arbeiten können. Übereinstimmend zu den anderen Bausteinen werden auch hier wieder der Anfangs- und der Endzeitpunkt im beweglichen Element gespei-

chert. Dabei liegt jedoch der Eingang des Transports, wie in Abbildung 5-5 gekennzeichnet, am Ende des Bausteins, an dem der Transport beginnt, und der Ausgang des Transports liegt am Anfang des Zielbausteins.



**Abbildung 5-5** Schematische Darstellung des Transports

Analog zu dem Element Montagestation wird das Element *Kommissionierung* abgebildet. Auch bei diesem Element werden die eingehenden Objekte auf einen Ladungsträger aufgeladen. Dieser ist jedoch in diesem Fall kein neu entstehendes Element, sondern stellt lediglich den in der Produktion umlaufenden Ladungsträger dar. Ein wesentlicher Unterschied zur Darstellung der Montage ist die Darstellung der Mitarbeiter. Für diesen Baustein werden die Mitarbeiter als Elemente, genau wie im Transport, abgebildet. Dies liegt daran, dass die Mitarbeiter an dieser Stelle nicht nur für das Kommissionieren, sondern auch für den Transport zuständig sind. Um die Dauer, die der Mitarbeiter für die Kommissionierung benötigt, darzustellen wird der Mitarbeiter für diesen Zeitraum an die Station gebunden. Erst nach Ablauf dieses Zeitraums kann er den Ladungsträger, der die kommissionierten Elemente enthält, zu seinem Zielort bringen. Der Ausgang des Bausteins Kommissionierung liegt dementsprechend, wie in Abbildung 5-6 dargestellt, am Anfang des Weges, den der Mitarbeiter nach der Kommissionierung zurückzulegen hat.



**Abbildung 5-6** Schematische Darstellung der Kommissionierung

### 5.2.3 Schnittstelle zur realen Produktion und dem Traceabilitysystem

Eine der wichtigsten Funktionen, die das Simulationsmodell bieten muss, ist die Übertragung des aktuellen Zustands der Produktion in das Modell. Das Simulationsmodell soll zum Zeitpunkt, an dem es ausgeführt wird, die aktuellen Daten aus dem Traceabilitysystem übernehmen und diese dann als Anfangsbelegung benutzen. Diese Anfangsbelegung wird gespeichert, sodass, nachdem ein Simulationslauf mit den aktuellen Bedingungen erfolgt ist, die gleichen Anfangswerte für weitere Simulationsläufe benutzt werden können. Das heißt, dass sowohl die gleichen Anfangswerte für Replikationen, als auch für die Experimente am System, verwendet werden können. Die Replikationen dienen dabei zur Absicherung des stochastischen Verhaltens des Systems (vergleiche Abschnitt 2.3.3) und ermöglichen eine zuverlässige Prognose des Systemverhaltens unter aktuellen Bedingungen. Bei der Durchführung von Experimenten hingegen werden die aktuellen Anfangswerte weiterhin, allerdings teilweise in abgewandelter Form, verwendet. Systematisch werden hierzu Parameter verändert, um das Verhalten des Systems zu analysieren.

Insgesamt besteht das Konzept aus drei Phasen, die durchlaufen werden. Die erste Phase lädt die aktuellen Daten aus dem Traceabilitysystem herunter und führt eine Anfangsbelegung des Systems durch, welche abgespeichert wird. In der zweiten Phase wird das Simulationsmodell mit der Anfangsbelegung ohne weitere Veränderung ausgeführt und dazu mehrere Replikationen durchgeführt. Die dritte Phase ist die der Experimente, auch bei ihr wird zunächst die abgespeicherte Anfangsbelegung geladen, dann aber werden Änderungen an ihr vorgenommen.

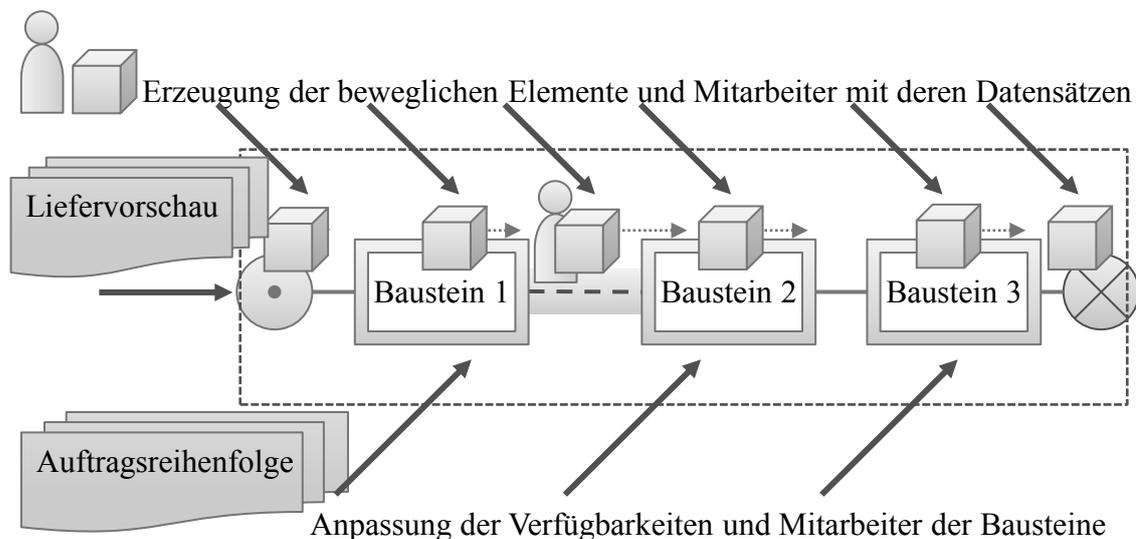
Wie bereits erläutert wird hier nicht dargestellt, auf welche Art und Weise die Daten aus dem Traceabilitysystem in die Simulation gelangen, allerdings muss definiert werden, welche Daten in die Anfangsbelegung übertragen werden. Der Datensatz der beweglichen Elemente ist im Simulationsmodell analog zu dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen gestaltet. Somit können alle in der realen Produktion erfassten Trace-Objekte in der Simulation durch bewegliche Elemente dargestellt werden. Dazu müssen die jeweiligen Prozessbausteine mit denselben Objekten wie in der Realität belegt werden. Diese beweglichen Elemente werden also auf den Bausteinen erzeugt und bekommen dieselben Daten wie das Original zugewiesen. Die realen Datensätze werden dann während der Simulation um den prognostizierten Verlauf ergänzt.

Neben der Anfangsbelegung der Bausteine mit den beweglichen Elementen muss außerdem die aktuelle Mitarbeiterbelegung übermittelt werden. Dazu werden einerseits die Anzahl der Mitarbeiter, die an den einzelnen Stationen zurzeit verfügbar sind, und andererseits die Anzahl der Logistikmitarbeiter in den einzelnen Bereichen abgerufen. Diese werden dann in der entsprechenden Anzahl im Simulationsmodell erzeugt. Neben der Anzahl soll auch das aktuell verwendete Schichtsystem übertragen werden und mit ihm

Informationen darüber, wie viele Mitarbeiter in den einzelnen Schichten eingeplant sind. Dies kann ebenfalls auf die Simulation übertragen werden.

Um die Verfügbarkeit an den Stationen auf dem aktuellen Stand zu halten, müssen die aktuellen Störungsdaten, wie etwa die mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen MTBF (engl. Mean Time Between Failures) und die mittlere Reparaturzeit MTTR (engl. Mean Time To Repair), übermittelt und in die Daten der Bausteine übertragen werden.

Damit der Materialeingang im Wareneingang prognostiziert werden kann, muss außerdem eine aktuelle Liefervorschau aus dem ERP-System gezogen werden. Diese erhält dann die für den Zeitraum der Modellierung vorausgesagten Objekte, die im Wareneingang angeliefert werden sollen. Die entsprechenden beweglichen Elemente können dann während der Simulation, entsprechend der vorausgesagten Lieferzeitpunkte, durch die Quelle erzeugt werden. Um die Reihenfolge, in der die Objekte in der Fabrik bearbeitet werden, zu ermitteln, muss außerdem die vorgegebene Auftragsreihenfolge aus dem ERP-System gezogen werden. Sie kann dann von den entsprechenden Bausteinen, wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, aufgerufen und abgearbeitet werden. Das Vorgehen bei der Übertragung des aktuellen Zustands ist in Abbildung 5-7 dargestellt.



**Abbildung 5-7** Erstellung des Initialzustands der Simulation

Für die Durchführung von Experimenten sollen die Mitarbeiterzahl, die Auftragsreihenfolge, die Kapazität, der Puffer und das Schichtsystem angepasst werden können. Dabei wird die aktuelle Kapazität der Puffer nicht aus dem aktuellen Zustand der Fabrik übertragen, da davon ausgegangen wird, dass dies ein Wert ist, der nicht vom aktuellen Zeitpunkt der Produktion abhängig ist, sondern zu den festgelegten Systemdaten gehört.

### 5.2.4 Verifikation und Validierung des Konzeptmodells

Das entstandene Konzeptmodell muss, bevor es weiter verwendet wird, verifiziert und validiert werden. Als Methode wird erneut das strukturierte Durchgehen gewählt. Dazu werden die einzelnen Anforderungen und Ziele durchgegangen und mit dem erstellten Konzeptmodell verglichen. Jedes Element wird auf seine Notwendigkeit hinsichtlich der zu erzielenden Funktionen untersucht und überprüft, ob alle Ziele mit den vorhandenen Elementen erfüllt werden können. Die Ergebnisse dieses Vorgehens sind in Tabelle 5-2 dargestellt.

**Tabelle 5-2** Ergebnisse des strukturierten Durchgehens des Konzeptmodells

<b>Funktionen/Aufgaben</b>	<b>Darstellung im Konzeptmodell</b>	<b>Plausibilität</b>
• Aufnahme und Speicherung der Traceabilitydaten	• Durch das im vierten Kapitel beschriebene Traceabilitysystem erfüllt	✓
• Übertragung der Daten des aktuellen Zustands (aus Traceabilitysystem) in Simulationsmodell	• Das Vorgehen zur Übertragung des Zustands wurde in Abschnitt 5.2.3 definiert	✓
• Abbildung der Vorgänge in der Produktion	• Abbildung über die in Abschnitt 5.2.1 definierten Elemente möglich	✓
• Prognose, wann sich welches Objekt wo in der Fabrik befindet	• Durch die vorgestellte Ablauf- und Aufbaustruktur (Abschnitt 5.2.2) kann der Verlauf der Elemente mit Hilfe eines Ereignisverwalters simuliert werden	✓
• Variationsmöglichkeiten über Experimente	• Veränderung der in Abschnitt 5.2.3 vorgestellten Anfangsbedingungen erlauben Experimente	✓
• Auswertung der Experimente	• Statistiken werden aufgezeichnet • Daten der Elemente werden in Historie mitgeschrieben	✓

### 5.3 Definition der notwendigen Daten

Ein grundlegender Aspekt bei der Formalisierung des Konzeptmodells ist die Datendefinition und Formalisierung. Die im Rahmen des Konzeptmodells bereits vorgestellten Daten werden dazu im Detail definiert. Dabei ist zu klären, welche Daten genau benötigt werden und in welchem Datenformat sie sich befinden müssen, damit die Verwendung durch das Simulationsmodell gewährleistet wird. Dazu werden die Daten so definiert, wie sie in der Umsetzung mit dem Werkzeug Plant Simulation verwendet werden können. Eine Übersicht über die verwendeten Datentypen und deren Wertebereich befindet sich im Anhang in Tabelle 8-3. Dabei werden nur die notwendigen Daten beschrieben. In manchen Fällen kann es sinnvoll sein, darüber hinaus noch weiterführende Informationen zu speichern. So kann es beispielsweise für die Übersichtlichkeit sinnvoll sein, jeweils zu den Materialnummern die passenden Materialbezeichnungen mitzuführen. Im Folgenden werden die Daten, unterteilt in System-, Eingangs-, Experiment- und Ergebnisdaten, beschrieben. Dabei werden zur Übersichtlichkeit die Attribute jeweils kursiv und die Listen fett hervorgehoben.

#### 5.3.1 Systemdaten des Konzepts

Um das reale System als Simulationsmodell, wie in dem in Abschnitt 5.2 vorgestellten Konzeptmodell, darzustellen, müssen eine Reihe von Daten über das System vorhanden sein. Dies sind die Daten, die prinzipiell unabhängig von den Simulationsläufen bestehen bleiben und einmalig festgelegt werden müssen. Sie können zwar ebenfalls angepasst werden, jedoch in der Regel nur dann, wenn sich etwas Grundlegendes an dem System verändert, weil etwa neue Produkte produziert werden sollen.

Für die Erstellung des Simulationsmodells müssen als erstes alle wesentlichen Prozesse identifiziert und deren Verbindungen untereinander, aber auch deren Attribute, beschrieben werden. Bei Verbindungen durch Transportvorgänge muss außerdem noch die jeweilige *Weglänge* mit aufgenommen werden. Die Bausteine mit ihrem definierten Verhalten und der Steuerung werden im Abschnitt 5.4 dargestellt. An dieser Stelle wird hingegen der Fokus auf die Daten, die die Produktion widerspiegeln, gelegt.

**Tabelle 5-3** Notwendige Daten und Datentypen zum Lagerort

Materialnummer	Lagerort
<i>integer</i>	<i>object</i>

Damit die beweglichen Elemente von den Transportmitarbeitern zu den richtigen Lagerplätzen gebracht und von ihnen kommissioniert werden können, gibt es die **Lagerortliste**. Sie enthält eine Übersicht, welches Objekt an welchem Ort liegt. Dazu müssen

lediglich die Attribute *Materialnummern* und *Lagerort*, wie in Tabelle 5-3 dargestellt, angegeben werden.

Die Lagerplätze besitzen lediglich die *Kapazität* als Attribut, sie muss am Anfang in Form der maximalen Lagerfläche angegeben werden. Zu den Arbeitsstationen, also den Bearbeitungs- und Montagestationen, müssen die *Mitarbeiteranzahl* und die *Verfügbarkeit* (in %) angegeben werden. Die eigentlichen Bearbeitungs- und Rüstzeiten sind nicht in der jeweiligen Station, sondern in einer getrennten Liste vermerkt. Dieser **Arbeitsplan**, welcher in Tabelle 5-4 dargestellt ist, enthält für jede Station eine eigene Tabelle. Diese enthält für jede Endkomponente (*Materialnummer der Endkomponente*) die Daten, die für diesen Baustein notwendig sind. Das ist neben der *Bearbeitungszeit* und der *Rüstzeit* auch das *nächste Ziel*, zu dem die Komponente gebracht werden muss. Da das Material an der Station eine Veränderung durchläuft, muss außerdem die Änderung der Materialnummer erkennbar sein. Dazu werden die *Materialnummer im Eingang* und die *Materialnummer im Ausgang* zu der entsprechenden Endkomponente vermerkt.

**Tabelle 5-4** Notwendige Daten und Datentypen des Arbeitsplans

Station	Details					
<i>object</i>	<i>table</i>					
	Materialnr. Endkomp.	Materialnr. Eingang	Materialnr. Ausgang	Grundzeit	Rüstzeit	nächstes Ziel
	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>time</i>	<i>time</i>	<i>object</i>

Für die Montagestation wird außerdem die Stückliste benötigt, welche zu jeder Komponente, die aus mehreren Komponenten besteht, Einträge enthält. Das heißt, in ihr sind nicht nur die Endprodukte mit ihren Komponenten, sondern auch die Teilkomponenten, die in einer Vormontage erstellt wurden, aufgeführt. Sie werden jeweils mit ihrer *Materialnummer* identifiziert. Die enthaltenen Komponenten werden jeweils mit den Attributen *Anzahl* und *Materialnummer* beschrieben. Eine solche Stückliste kann wie in Tabelle 5-5 aufgebaut sein.

**Tabelle 5-5** Notwendige Daten und Datentypen der Stückliste

Montierte Komponente	1. enthaltene Komponente		2. enthaltene Komponente		...
Materialnr.	Anzahl	Materialnr.	Anzahl	Materialnr.	...
<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>integer</i>	...

### 5.3.2 Eingangsdaten

Die Eingangsdaten werden, wie bereits in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, einerseits aus den Daten des Traceabilitysystems oder andererseits aus anderen Systemen, wie etwa einem ERP-System übertragen. Aus dem Traceabilitysystem werden sowohl die aktuellen Zustände (Verfügbarkeiten, Mitarbeiter etc.), als auch die aktuelle Belegung der Stationen in der Produktion übertragen. Aus den anderen Systemen muss eine **Liefervorschau** und eine **Auftragsliste** in das Simulationsmodell übertragen werden.

Die aktuellen Zustände der Produktion bestehen aus den aktuellen Mitarbeitern in der Produktion und den Verfügbarkeiten der Stationen beziehungsweise Mitarbeiter. Da die Mitarbeiter an der Bearbeitungs- und Montagestation lediglich durch das Attribut *Mitarbeiteranzahl* dargestellt werden, muss diese für jede Station angepasst werden.

**Tabelle 5-6** Erzeugungstabelle für die Transportmitarbeiter

Werkertyp	Anzahl	Schicht	Dienste
<i>object</i>	<i>string</i>	<i>string</i>	<i>string</i>

Für die Mitarbeiter, die im Transportprozess dargestellt werden, müssen hingegen weitere Daten, wie in Tabelle 5-6 dargestellt, definiert werden. Das Attribut *Werker* fasst eine Klasse von Mitarbeitern mit denselben Eigenschaften zusammen und beinhaltet Eigenschaften wie deren *Geschwindigkeit*. Um anzugeben, welche Tätigkeiten der Werker ausführen kann, bekommt er eine Art Arbeitsrolle, das Attribut *Dienst*, zugewiesen. Für jede solche Kombination aus *Werkertyp* und *Dienst* wird außerdem die entsprechende *Anzahl*, in der dieser vorhanden ist, festgelegt. Das Attribut *Schicht* verweist auf die im Schichtplan festgelegten Arbeitszeiten. Dieser sieht wie in Tabelle 5-7 dargestellt aus und legt fest, welche Station zu welchem Zeitpunkt arbeitet. Er enthält sowohl die Arbeitszeit als auch die Arbeitstage.

**Tabelle 5-7** Aufbau des Schichtplans

Ressourcen	Schichten									
<i>object</i>	<i>table</i>									
	Schicht	von	bis	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
	<i>string</i>	<i>time</i>	<i>time</i>	<i>boolean</i>						

Neben dem Schichtplan werden auch die aktuellen Verfügbarkeitsdaten entsprechend der erhobenen MTTR und MTBF Daten übertragen. Diese werden dann im Attribut

*Verfügbarkeit* (in Prozentanteil der verfügbaren Zeit) und der zugehörigen Verteilungsfunktion in jeden Baustein gespeichert.

Für die Übertragung der aktuellen Belegung der Stationen müssen jeweils bewegliche Elemente auf die unterschiedlichen Bausteine (Lagerplätze, Arbeitsstationen und Transportvorgänge) übertragen werden. Dabei müssen, neben der Menge der unterschiedlichen beweglichen Elemente, auch deren Attribute übertragen werden. Der Datensatz, der dazu im Simulationsmodell verwendet wird, ist in Tabelle 5-8 dargestellt. Neben den Nummern zur Identifizierung des Elements wie der *ID*, der *Auftragsnummer* der Eingangs *Materialnummer* und der *Materialnummer*, die aus dem Element entstehen soll (*Materialnummer der Endkomponente*), müssen auch zwei Tabellen angelegt werden. Die *Historie* enthält die Stationen, die das Element bereits durchlaufen hat, mit den entsprechenden Zeitpunkten und *Materialnummern*. Die Tabelle *enthaltene Komponenten* hingegen enthält die Daten der enthaltenen Elemente und beinhaltet daher selbst wieder die Tabelle *Historie*.

**Tabelle 5-8** Attribute der beweglichen Elemente

Attribut	Datentyp																
Auftragsnummer	<i>integer</i>																
frühester Zeitpunkt	<i>time</i>																
Materialnr. der Endkomponente	<i>integer</i>																
Historie	<i>table</i>																
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Anfangszeit</th> <th>Endzeit</th> <th>Vorgangsart</th> <th>Station</th> <th>Materialnr. vorher</th> <th>Materialnr. nachher</th> <th>von Station</th> <th>zu Station</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><i>time</i></td> <td><i>time</i></td> <td><i>string</i></td> <td><i>object</i></td> <td><i>integer</i></td> <td><i>integer</i></td> <td><i>object</i></td> <td><i>object</i></td> </tr> </tbody> </table>	Anfangszeit	Endzeit	Vorgangsart	Station	Materialnr. vorher	Materialnr. nachher	von Station	zu Station	<i>time</i>	<i>time</i>	<i>string</i>	<i>object</i>	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>object</i>	<i>object</i>
Anfangszeit	Endzeit	Vorgangsart	Station	Materialnr. vorher	Materialnr. nachher	von Station	zu Station										
<i>time</i>	<i>time</i>	<i>string</i>	<i>object</i>	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>object</i>	<i>object</i>										
Enthaltene Komponenten	<i>table</i>																
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Anzahl</th> <th>Materialnummer</th> <th>ID</th> <th>Historie</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><i>integer</i></td> <td><i>integer</i></td> <td><i>integer</i></td> <td><i>table</i></td> </tr> </tbody> </table>	Anzahl	Materialnummer	ID	Historie	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>table</i>								
Anzahl	Materialnummer	ID	Historie														
<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>table</i>														
ID	<i>integer</i>																
Losgröße	<i>integer</i>																
Materialnummer	<i>integer</i>																
Nächstes Ziel	<i>object</i>																

Die Auftragsreihenfolge muss wie in Tabelle 5-9 aufgebaut sein, wobei davon ausgegangen wird, dass ein Auftrag jeweils nur sortenrein ist und dementsprechend nur eine *Materialnummer* enthält. Wenn ein Auftrag aus unterschiedlichen Endprodukten be-

steht, werden diese in der Auftragsreihenfolge als mehrere Einzelaufträge dargestellt. Jeder Auftrag hat eine eindeutige *Auftragsnummer* und ihm wird die *Anzahl* der zu erstellenden Objekte mit deren *Materialnummern* zugewiesen.

**Tabelle 5-9** Notwendige Daten für die Auftragsreihenfolge

Auftragsnummer	Anzahl	Materialnummer
<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>integer</i>

Damit die Quelle die beweglichen Elemente entsprechend der realen Prognosen erzeugen kann, muss in einer Liefervorschau festgehalten werden, welche Objekte in welcher Reihenfolge erzeugt werden. Dazu wird einerseits der *Elementtyp* (einzelnes Element oder Ladungsträger) in der entsprechenden *Anzahl* erzeugt. Damit die beweglichen Elemente durch das System laufen können, brauchen sie andererseits noch individuelle Attribute. Dazu gehören die *Materialnummer* des Objekts, das sie repräsentieren, sowie die Materialnummer der zu erstellenden *Endkomponenten*. Damit die beweglichen Elemente vom Wareneingang zur richtigen Station gebracht werden, muss außerdem noch durch das Attribut *Zielort* angegeben werden, wohin sie transportiert werden. Die Liefervorschau muss der in Tabelle 5-10 dargestellten Form entsprechen.

**Tabelle 5-10** Vorlage für die Liefervorschau

Elementtyp	Anzahl	Attribute									
<i>object</i>	<i>integer</i>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3"><i>table</i></th> </tr> <tr> <th>Materialnr.</th> <th>Materialnr. der Endkomponente</th> <th>Zielort</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><i>integer</i></td> <td><i>integer</i></td> <td><i>object</i></td> </tr> </tbody> </table>	<i>table</i>			Materialnr.	Materialnr. der Endkomponente	Zielort	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>object</i>
<i>table</i>											
Materialnr.	Materialnr. der Endkomponente	Zielort									
<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>object</i>									

### 5.3.3 Experimentdaten

Für die Experimente sollen die Daten, die aus der realen Produktion übertragen worden sind, systematisch abgewandelt werden, um zu neuen Erkenntnissen zu gelangen. Als wesentlicher Parameter mit dem experimentiert wird, können die Mitarbeiter benannt werden. Um herauszufinden, welche Auswirkung diese auf die Durchlaufzeiten der Endkomponenten haben, soll deren Anzahl verändert werden können. Da in einem solchen Modell eine Vielzahl an Montage- und Bearbeitungsstationen vorhanden sein sollen, wird für die Veränderung der Mitarbeiterzahl eine zentrale Liste gewählt, die wie in Tabelle 5-11 dargestellt, aussieht.

**Tabelle 5-11** Experimentliste für die Mitarbeiteranzahl an den Arbeitsstationen

Name der Arbeitsstation	Mitarbeiteranzahl
<i>object</i>	<i>integer</i>

Die Transportmitarbeiter können mit Hilfe der in Abschnitt 5.3.1 dargestellten Erzeugungstabelle angepasst werden. Außerdem soll am Schichtsystem experimentiert werden können, dazu muss einerseits auf die in den Transportmitarbeitern hinterlegten Schichtsysteme und andererseits auf den Schichtplan selbst zugegriffen werden (vgl. Tabelle 5-7). Des Weiteren kann es sinnvoll sein, die Kapazität der Lagerplätze zu verändern. Dies kann auch durch eine zentrale Liste der Lagerplätze erfolgen. Diese ist in Tabelle 5-12 dargestellt.

**Tabelle 5-12** Experimentliste für die Lagerplatzkapazität

Name der Arbeitsstation	Kapazität
<i>object</i>	<i>integer</i>

Ein wichtiger Aspekt, um die Veränderungen an dem System zu betrachten, ist außerdem die Auftragsreihenfolge. Um diese zu verändern kann einfach die Reihenfolge der Einträge der in Tabelle 5-9 vorgestellten Liste verändert werden.

### 5.3.4 Ergebnisdaten

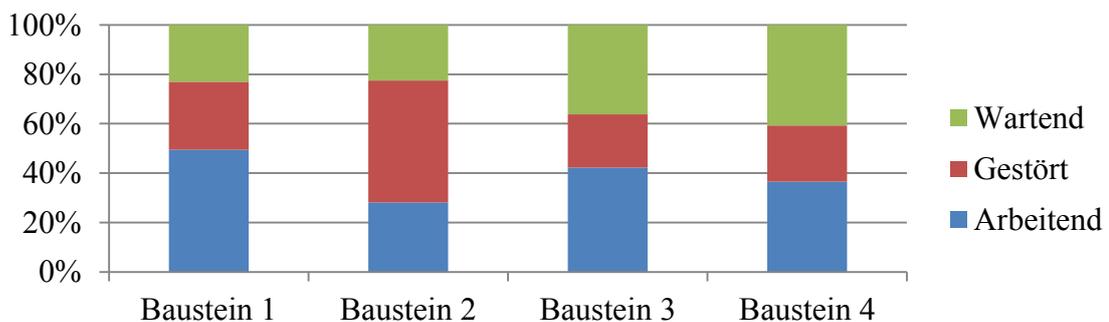
Damit die Daten der beweglichen Elemente auch nach dem Ende der Simulation erhalten bleiben, gibt es eine Übersicht über alle Elemente, die im Verlauf der Simulation die Senke durchlaufen haben. In dieser sind alle wesentlichen Daten zu dem Werdegang und den enthaltenen Komponenten zusammengefasst. Die Endtabelle enthält die in Tabelle 5-13 (die Überschriften-Zeile wurde hier der Übersichtlichkeit halber als Spalte dargestellt) dargestellten Daten und beinhaltet daher weitere Tabellen, die Details zu den Komponenten und dem Werdegang wiedergeben.

**Tabelle 5-13** Inhalt der Endtabelle mit allen gefertigten Komponenten

Auftragsnr	<i>integer</i>
Identifikationsnr.	<i>integer</i>
Materialnr	<i>integer</i>
Frühster Anfangszeitpunkt	<i>time</i>
Kommissionierzeitpunkt	<i>time</i>
Endzeitpunkt	<i>time</i>

Details	<i>table</i>							
	Anfangs-zeit	End-zeit	Vor-gangsart	Station	Materi-alnr. vorher	Materi-alnr. nachher	von Station	zu Station
	<i>time</i>	<i>time</i>	<i>string</i>	<i>object</i>	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>object</i>	<i>object</i>
Enthaltene Komponenten	<i>table</i>							
	Anzahl	Materialnr.	Bezeichnung	Identifikationsnr.	Historie			
	<i>integer</i>	<i>integer</i>	<i>string</i>	<i>integer</i>	<i>table</i>			
Durchlaufzeit nach Kommissi-onierung	<i>time</i>							
Durchlaufzeit	<i>time</i>							

Um die Auslastung des Systems zu analysieren, gibt es zudem noch eine Reihe von Auslastungsdiagrammen, die zum Ende der Simulation erzeugt werden. Sowohl für die einzelnen Arbeitsstationen, als auch für die Lagerplätze werden Diagramme erstellt, die für jeden Baustein die Auslastung wiedergeben. Dazu werden die in jedem Baustein erhobenen Statistikdaten in einer Tabelle gesammelt und daraus dann Diagramme erstellt. Diese sind wie in Abbildung 5-8 aufgebaut und bestehen aus gestapelten Balkendiagrammen, die jeweils 100 % der Zeit entsprechen. Sie geben übersichtlich die wichtigsten Daten wieder. In derselben Weise können auch Auslastungsdiagramme für die Zeitanteile der Transportmitarbeiter erzeugt werden



**Abbildung 5-8** Exemplarisches Auslastungsdiagramm

Generell gilt, dass bei der Betrachtung der Ergebnisdaten zu beachten ist, dass der Zeitraum, in dem sich das System einschwingt, wie bereits in Abschnitt 2.3.3 erläutert, nicht in die Betrachtung mit eingehen darf.

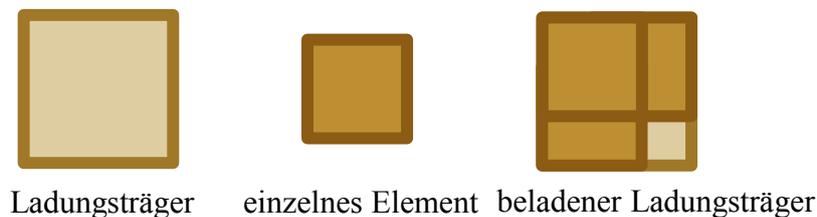
## 5.4 Modellformalisierung und Implementierung

Da die Umsetzung des Simulationsmodells mit dem Simulationswerkzeug Plant Simulation durchgeführt werden soll, erfolgt an dieser Stelle statt einer formalen Modellierung, mit Hilfe einer allgemeingültigen Modellierungssprache, eine direkte Beschreibung des Modells mit den spezifischen Modellelementen. Die jeweiligen Elemente werden in der Form, in der sie verwendet und abgewandelt werden, beschrieben. Für eine allgemeine, detaillierte Erläuterung der einzelnen Bausteine und Funktionen von Plant Simulation, wird auf die entsprechende Fachliteratur, beispielsweise von Eley (2012) oder Bangsow (2011), verwiesen.

Die im Rahmen der Systemanalyse vorgestellten Modellelemente werden im Folgenden systematisch auf die in Plant Simulation vordefinierten Bausteine übertragen und erläutert. Dazu wird zunächst das grundlegende Verhalten des Systems beschrieben. Dabei werden die grundlegenden Verhaltensstrukturen, wie die Weitergabe der Elemente über die Kanten oder die Abarbeitung der Ereignisse durch den Ereignisverwalter, nicht detailliert dargestellt. Die darüber hinaus selbst erstellten Steuerungen, die für das Systemverhalten notwendig sind, werden jeweils mit ihrem Namen erwähnt und anschließend im Detail beschrieben.

### 5.4.1 Definition der Objekte und deren Verhalten

Entsprechend zu den zwei verschiedenen Arten von beweglichen Elementen werden die beiden Typen, Ladungsträger und einzelnes Element, in Plant Simulation angelegt. Diese sehen dann wie in Abbildung 5-9 dargestellt aus. Prinzipiell wäre es möglich, ihnen eine individuelle Farbe oder Form zu geben, dies hat jedoch für den vorgestellten Anwendungszweck keine Relevanz und daher werden ihnen lediglich die in Abschnitt 5.3.2 in Tabelle 5-8 vorgestellten Attribute zugewiesen.

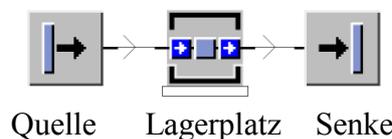


**Abbildung 5-9** Darstellung der beweglichen Elemente

Alle Bausteine, über die die beweglichen Elemente laufen, besitzen eine Eingangs- und eine Ausgangssteuerung. Die Eingangssteuerung wird direkt, wenn das Element den Baustein betritt, ausgeführt und heißt Historie Eingang, wohingegen die Ausgangssteuerung in dem Moment, wenn das Element den Baustein verlässt, ausgeführt wird und Historie Ausgang heißt. Die Bausteine besitzen außerdem ein Ausgangsverhalten das festlegt, wohin das Element gelangt, wenn es den Baustein verlässt. Für dieses Konzept

stehen die beiden Alternativen „Teile wegtragen“ für den anschließenden Transport oder „abhängig von Attribut“ für den Ausgang über eine Kante im Simulationswerkzeug zur Auswahl. Für das Verhalten „abhängig von Attribut“ wird die Methode Zielort aufgerufen, die abhängig vom Attribut *Nächstes Ziel*, das Element an den entsprechenden Baustein umlagert.

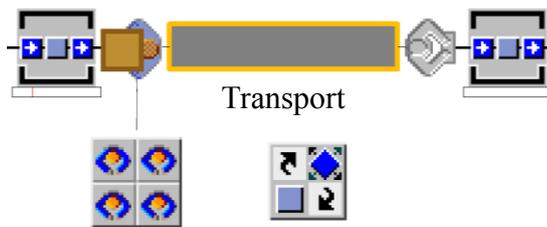
Die Quelle erzeugt die beweglichen Elemente entsprechend der Liefervorschau und über die Kante werden die Elemente direkt ohne einen Zeitverbrauch an einen der verbundenen Lagerplätze verschoben. Diese sind jeweils über eine Kante mit ihr verbunden und dementsprechend ist das Ausgangsverhalten immer abhängig von dem Attribut *nächstes Ziel*. Die Quelle kann nur Elemente produzieren, wenn der Lagerplatz, an den die Elemente gehen, genügend Kapazität hat, da sich immer höchstens ein Element auf der Quelle befinden kann.



**Abbildung 5-10** Verbindung von Quelle, Lagerplatz und Senke

In der Senke passiert genau das Gegenteil, sie vernichtet die Elemente, nachdem sie über die Kante vom vorgelagerten Lagerplatz gekommen sind. Damit sie vor dem Vernichten der Elemente die enthaltenen Attribute speichert, wird in der Eingangssteuerung die Methode EndtabelleErzeugen aufgerufen, die die Daten in die **Endtabelle** (vgl. Tabelle 5-13) überträgt. Sowohl Quelle als auch Senke müssen jeweils über eine Kante mit mindestens einem Lagerplatz verbunden sein, da sie die Entnahme bzw. das Befüllen von außerhalb der Systemgrenzen liegenden Objekten darstellt. In Abbildung 5-10 sind beispielhaft eine Quelle, ein Lagerplatz und eine Senke dargestellt, die über Kanten verbunden sind.

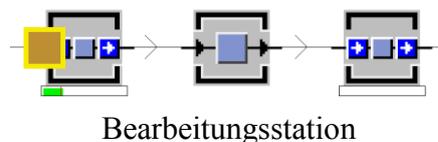
Im Gegensatz zu Quelle und Senke, deren Durchlaufen im Werdegang der Elemente nicht vermerkt wird, muss ein Lagerplatz in diesem aufgenommen werden. Dazu wird in der Eingangssteuerung die Methode Historie Eingang und in der Ausgangssteuerung die Methode Historie Ausgang aufgerufen. Ein Lagerplatz hat lediglich ein Attribut *Kapazität*, das angibt, wie viele Elemente auf ihm gelagert werden. Solange diese Kapazität nicht erreicht ist, kann er entweder durch einen Transport (Abbildung 5-11) oder eine Kante mit Elementen beladen werden.



**Abbildung 5-11** Darstellung des Transports

Der Transport setzt sich aus den in Abbildung 5-11 dargestellten Elementen zusammen und erfolgt jeweils zwischen Lagerplätzen. Neben den Wegen und den Mitarbeitern, die in Abschnitt 5.2 bereits definiert wurden, müssen bei der Übertragung in Plant Simulation noch weitere Elemente hinzugefügt werden. Sogenannte „Arbeitsplätze“ kennzeichnen, an welchen Punkten der Mitarbeiter die beweglichen Elemente entnehmen und abladen kann. Diese Arbeitsplätze besitzen, genau wie die anderen Bausteine, jeweils Ein- und Ausgangsteuerungen, welche dann Methoden wie die Historie Eingang und die Historie Ausgang aufrufen können.

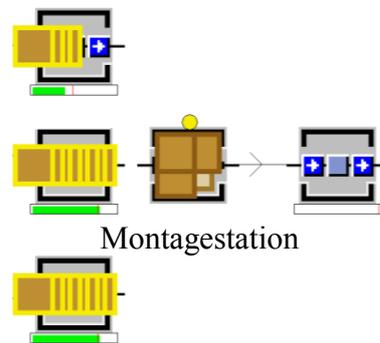
Zwischen diesen Arbeitsplätzen befindet sich das Wegenetz, auf dem die Mitarbeiter sich bewegen. Der „Werkerpool“ stellt, ähnlich zu einem Aufenthaltsraum, den Raum dar, in dem die Mitarbeiter auf ihren Auftrag warten. Er besitzt als Attribute die Erzeugungstabelle der Mitarbeiter, wie in Tabelle 5-6 dargestellt. Die einzelnen Mitarbeiter besitzen als Attribute einen *Dienst* (Logistik oder Kommissionieren, abhängig davon, in welcher Rolle sie sind), eine *Geschwindigkeit* und eine *Kapazität*. Die Reihenfolge, in der die einzelnen Transportvorgänge abgearbeitet werden, wird durch den „Broker“ ermittelt. Dieser nimmt, sobald ein bewegliches Element den Ausgangspunkt eines Bausteins erreicht, jeweils einen Auftrag entgegen, welcher dann der Reihenfolge nach abgearbeitet wird.



**Abbildung 5-12** Darstellung der Bearbeitungsstation

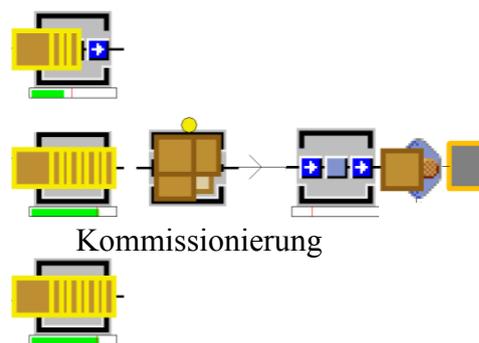
Eine Bearbeitungsstation sieht wie in Abbildung 5-12 dargestellt aus und wird immer über eine Kante von einem oder mehreren Lagerplätzen mit Elementen beliefert. Hinter einer Bearbeitungsstation befindet sich auch jeweils mindestens ein Lagerplatz, der über eine Kante beliefert wird. Die Bearbeitungsstation besitzt die Attribute *Verfügbarkeit*, *Rüstzeit*, *Bearbeitungszeit* und *Mitarbeiter*. Um die *Bearbeitungszeit*, die abhängig von der Materialnummer des Elements erstellt wird, zu ermitteln, wird die Methode Bearbeitungszeitformel aufgerufen. Die *Rüstzeit* wird dementsprechend durch die Methode Rüstzeitformel ermittelt. Genau wie bei den Lagerplätzen werden auch hier bei der Eingangs- und Ausgangsteuerung die Methoden Historie Eingang und Historie Ausgang

aufgerufen. Bei der Bearbeitungsstation werden die Elemente jeweils in der Reihenfolge, in der die Teile vom Lagerplatz geliefert werden, bearbeitet.



**Abbildung 5-13** Darstellung der Montage und der Kommissionierung

Dies ist bei der Montagestation anders, denn bei ihr werden die Teile aktiv von den Lagerplätzen entnommen. Da dies über eine Methode funktioniert, ist in diesem Fall keine Kante notwendig, wie in Abbildung 5-13 erkennbar ist. Für die Montagestation wird jeweils die zugehörige Methode Montagesteuerung aufgerufen, die jeweils die benötigten Elemente vorgibt. Wenn diese auf den Lagerplätzen vorhanden sind, werden sie von diesen entfernt. Auf dem Baustein wird ein Ladungsträger erzeugt, auf den die Elemente geladen werden und der die Datensätze der enthaltenen Komponenten in seinen Datensatz gespeichert bekommt. Der Baustein enthält, analog zur Bearbeitungsstation, die Attribute *Verfügbarkeit*, *Rüstzeit*, *Bearbeitungszeit* und *Mitarbeiter*. Die *Bearbeitungszeit* und die *Rüstzeit* werden auf dem gleichen Wege wie bei der Bearbeitungsstation durch die entsprechenden Methoden ermittelt. Nachdem die *Bearbeitungszeit* verstrichen ist, werden die Elemente über eine Kante weitergereicht. Außerdem wird sowohl die Methode Historie Eingang als auch die Methode Historie Ausgang ausgeführt.



**Abbildung 5-14** Kommissionierung

Wie in Abbildung 5-13 erkennbar ist, ist die Einbeziehung der Mitarbeiter ein wesentlicher Unterschied zwischen der Montage- und der Kommissionierstation. An der Kommissionierstation wird der Mitarbeiter statt durch das Attribut Mitarbeiteranzahl durch einen Transportmitarbeiter dargestellt. Demnach benötigt der Kommissionierungsvorgang, der durch die Methode Kommissioniersteuerung erfolgt, keine Zeit. Stattdessen

werden die kommissionierten Elemente von einem Mitarbeiter abgeholt. Die eigentliche Kommissionierdauer wird dann durch das Verweilen des Kommissionierers an dem Lagerplatz abgebildet. Der Transportvorgang wird also erst nach der verstrichenen Zeit ausgeführt. Demnach wird die Methode Historie Eingang ausgeführt, wenn die Elemente auf dem Baustein verfügbar sind, die Methode Historie Ausgang wird allerdings erst ausgeführt, wenn die Zeitdauer der Kommissionierung beendet ist. Somit besitzt die Station kein Attribut *Mitarbeiter*, *Bearbeitungszeit*, *Verfügbarkeit* oder *Rüstzeit*, sondern die Kommissionierung erfolgt direkt wenn die Elemente verfügbar sind.

#### 5.4.2 Verknüpfung der Steuerung durch die Methoden

Die im vorherigen Abschnitt erwähnten Methoden werden hier mit ihren Algorithmen beschrieben, wobei statt des Originalcodes, der in der werkzeugeigenen Sprache Simtalk formuliert ist, die Darstellung mit Hilfe von Pseudocodes gewählt wurde. Dazu werden Struktogramme (auch Nassi-Shneiderman-Diagramme genannt) gewählt, welche nach DIN 66261 genormt wurden. Eine Erläuterung der Strukturen dieser Diagramme findet sich im Anhang in Tabelle 8-4.

In den Struktogrammen wird dabei lediglich der Ablauf der Methode in Pseudocode beschrieben, aber nicht der detaillierte Programmablauf wiedergegeben. Das bedeutet, dass nicht alle Variablen benannt werden und auch nicht alle Abfragen oder Fehlermeldungen erwähnt werden.

Durch die Verwendung von sogenannten „Anonymen Bezeichnern“, wie der Bezeichnung „aktuelles Element“ oder „aktuelle Station“, die in Plant Simulation vorhanden sind, wird gewährleistet, dass die Methoden unabhängig vom Anwenderfall verwendet werden können, ohne dass sie an die benutzten Bausteine angepasst werden. Das aktuelle Element ist dabei immer das bewegliche Element, das die jeweilige Steuerung ausgelöst hat und die aktuelle Station ist die, auf der sich das aktuelle Element zu dem Zeitpunkt befindet.

Die Init-Methode wird zu Beginn der Simulation ausgeführt und ist demnach das erste Ereignis, das ausgeführt wird. In ihr werden zu Beginn die Daten aus dem Traceabilitysystem aufgerufen, dazu steht stellvertretend die Methode Datentransfer aus Traceabilitysystem, die hier nicht näher erläutert wird. Außerdem werden die Experimentdaten, die eingegeben wurden, abgerufen. Da die Daten für die Stationen direkt über eine Eingabetabelle eingetragen werden, die von einem sogenannten Attributverwalter direkt angepasst werden, brauchen diese nicht in der Init-Methode aufgerufen werden. Wichtig ist jedoch der Aufruf Methoden der Montage und Kommissionierung, da diese ab dem Aufruf ausgeführt werden und sich dann entsprechend, wie später dargestellt, weiter selbst aufrufen. Das Struktogramm der Init-Methode, welches in Tabelle 5-14 dargestellt ist, fasst die zentralen Vorgänge zusammen.

**Tabelle 5-14** Struktogramm der Init-Methode

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rufe die Methode <u>Datentransfer aus Traceabilitysystem</u> auf</li> <li>• Schließe alle Auslastungsdiagramme</li> <li>• Leere die <b>Endtabelle</b></li> <li>• Lade die <b>Erzeugungstabelle</b> der Logistikmitarbeiter</li> <li>• Überschreibe die Anzahl der Mitarbeiter mit den Werten der globalen Variable <i>AnzahlTransportmitarbeiter</i></li> <li>• Rufe die Methode <u>Montagesteuerung</u> für jede Montagestation auf</li> <li>• Rufe die Methode <u>Kommissioniersteuerung</u> für jede Montagestation auf</li> </ul> |
|--|

Wie bereits beschrieben, gibt es an jedem Baustein einen Eingangs- und einen Ausgangssensor, der jeweils eine Steuerung aufruft. Am Eingang wurde dafür die Historie Eingang (vgl. Tabelle 5-15) und am Ende die Historie Ausgang (vgl. Tabelle 5-16) geschrieben. Wesentlicher Inhalt der beiden Methoden ist die Speicherung der aktuellen Zustände der beweglichen Elemente. Damit für jeden Baustein immer die gleiche Methode verwendet werden kann, gibt es Fallunterscheidungen abhängig von der Art der aktuellen Station. Bei den Arbeitsplätzen ist beispielsweise die Lage im Bezug zum Transport wichtig, da die Daten, die an diesen erhoben werden, unterschiedlich sind. Die Details dazu können den Struktogrammen der beiden Methoden in Tabelle 5-15 und Tabelle 5-16 entnommen werden.

**Tabelle 5-15** Struktogramm der Methode Historie Eingang

Aufgerufen durch einen Lagerplatz mit Ausgangsverhalten „Teil wegtragen“		falsch
wahr	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dem Attribut <i>BEZiel</i> der Station wird der Wert des Attributs <i>nächstes Ziel</i> des aktuellen Elements zugewiesen</li> </ul>	
Inhalt des Lagerplatzes < Losgröße des aktuellen Elements		falsch
wahr	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Ausgang des Lagerplatzes ist gesperrt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Ausgang des Lagerplatzes ist freigegeben</li> </ul>

Aktuelle Station ist nicht Arbeitsplatz am Ende des Transports		falsch
wahr	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suche die aktuelle Zeile der <i>Historie</i> des aktuellen Elements und gehe eine Zeile weiter</li> <li>Attribut <i>Anfangszeit</i> der <i>Historie</i> des aktuellen Elements bekommt die aktuelle Simulationszeit zugewiesen</li> <li>Attribut <i>Art des Transportvorgangs</i> der <i>Historie</i> des aktuellen Elements bekommt die Art der aktuellen Station zugewiesen</li> <li>Attribut <i>Materialnummer vorher</i> der <i>Historie</i> des aktuellen Elements bekommt die aktuelle Materialnummer zugewiesen</li> </ul>	
Aktuelle Station ist ein Arbeitsplatz am Anfang des Transports		falsch
wahr	<ul style="list-style-type: none"> <li>Attribut <i>von Station</i> der <i>Historie</i> des aktuellen Elements bekommt den Namen der aktuellen Station zugewiesen</li> <li>Unterbreche den Transportvorgang entsprechend dem Wert des Attributs <i>Auf-/Abladezeit</i> des aktuellen Elements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Attribut <i>Station</i> der <i>Historie</i> des aktuellen Elements bekommt den Namen der aktuellen Station zugewiesen</li> </ul>

**Tabelle 5-16** Struktogramm der Methode Historie Ausgang

Aktuelle Station ist eine Bearbeitungs- oder Montagestation		falsch
wahr	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suche die Arbeitsstation im <b>Arbeitsplan</b></li> <li>Öffne die Untertabelle der Arbeitsstation</li> <li>Suche die Zeile, die dem Attribut <i>Materialnummer</i> des aktuellen Elements in der Untertabelle entspricht</li> <li>Speichere den Wert der Spalte „Materialnummer Ausgang“ in dem Attribut <i>Materialnummer</i> des aktuellen Elements</li> <li>Speichere den Wert der Spalte „nächstes Ziel“ in dem Attribut <i>nächstes Ziel</i> des aktuellen Elements</li> </ul>	
Aktuelle Station ist nicht Arbeitsplatz am Anfang des Transports		falsch
wahr	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suche die aktuelle Zeile der <i>Historie</i> des aktuellen Elements</li> <li>Attribut <i>Endzeit</i> der <i>Historie</i> des aktuellen Elements bekommt die aktuelle Simulationszeit zugewiesen</li> <li>Attribut <i>Materialnummer nachher</i> der <i>Historie</i> des aktuellen Elements bekommt den Wert des Attributs <i>Materialnummer</i> zugewiesen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die <i>Kapazität</i> des angeforderten Transportmitarbeiters bekommt den Wert des Attributs <i>Losgröße</i> des aktuellen Elements zugewiesen</li> </ul>

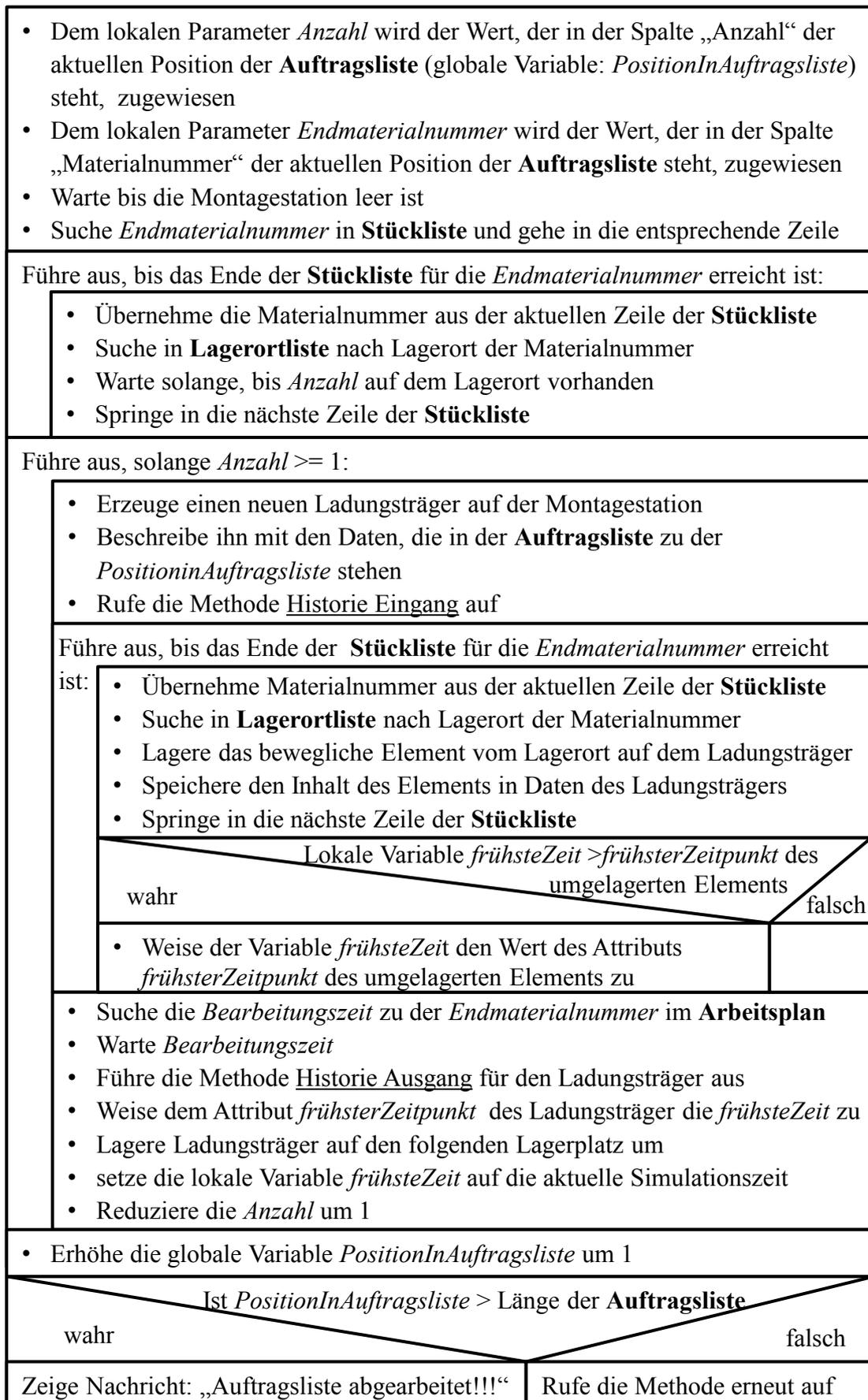
Aktuelle Station ist ein Arbeitsplatz am Ende des Transports		
wahr	falsch	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Attribut <i>nach Station</i> der <i>Historie</i> des aktuellen Elements bekommt den Namen der aktuellen Station zugewiesen</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktuelles Element wird auf nächste Station umgelagert</li> </ul>		

Das Struktogramm der Methode Bearbeitungszeitformel, welches in Tabelle 5-17 dargestellt ist, beschreibt, wie die jeweilige Station den Wert der Bearbeitungszeit erhält. Die Methode wird von der Bearbeitungsstation und der Montagestation ausgeführt und gibt als Rückgabewert den Zeitwert, den die beweglichen Elemente auf der Station verweilen müssen, zurück. Im Struktogramm ist der Einfluss der Mitarbeiter beispielhaft durch eine lineare Abnahme der Bearbeitungszeit bei Erhöhung der Mitarbeiter dargestellt. Die genaue Abhängigkeit muss jedoch individuell angepasst werden. Die Rüstzeit wird ähnlich zur Bearbeitungszeit bestimmt und wird daher nicht extra in einem Struktogramm beschrieben. Statt dem Wert der Bearbeitungszeit wird die Rüstzeit ausgelesen. Außerdem muss zu Beginn eine Abfrage erfolgen, ob das vorherige Element die gleiche Bearbeitung hat und demnach nicht gerüstet werden muss. In diesem Fall ist dann eine Rüstzeit von 0 anzunehmen.

**Tabelle 5-17** Struktogramm der Methode Bearbeitungszeitformel

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suche im <b>Arbeitsplan</b> die Zeile, die die aktuelle Station enthält</li> <li>• Öffne die Tabelle <i>Details</i> in der aktuellen Zeile</li> <li>• Suche die Zeile, die in der Spalte „Materialnummer Endkomponente“ den gleichen Wert wie das Attribut <i>Endkomponente Materialnummer</i> des aktuellen Elements besitzt</li> <li>• Übertrage den Wert der Spalte „Bearbeitungszeit“ in die lokale Variable <i>Bearbeitungszeitvorläufig</i></li> <li>• Weise der lokalen Variablen <i>Bearbeitungszeit</i> das Ergebnis von <i>Bearbeitungszeitvorläufig</i>/ <i>Mitarbeiterzahl</i> zu</li> <li>• Der Rückgabewert ist der Wert der Variablen <i>Bearbeitungszeit</i></li> </ul>
--

Die Methode Montagestation wird, im Gegensatz zu den anderen Methoden, von einer Methode aufgerufen und nicht von einer internen Steuerung. Zu Beginn wird sie von der Init-Methode aufgerufen und ruft sich dann selbst solange auf bis die Auftragsliste abgearbeitet ist. Diese Struktur bedingt, dass pro Montagestation oder Kommissionierstation sowohl eine eigene Auftragsliste, als auch ein eigener Aufruf in der Init-Methode vorhanden sein muss. Das detaillierte Struktogramm ist in Tabelle 5-18 dargestellt.

**Tabelle 5-18** Struktogramm der Steuerung der Montagestation

Damit in der Senke die Daten der beweglichen Elemente gespeichert werden, ruft die Eingangssteuerung der Senke die Methode Endtabelleerzeugen auf. Diese speichert die Attribute der beweglichen Elemente, wie in Tabelle 5-19 dargestellt, in der **Endtabelle**.

**Tabelle 5-19** Struktogramm der Methode Endtabelleerzeugen

- Gehe in der **Endtabelle** in die Zeile, die der Nummer der globalen Variable *ZeileDerEndtabelle* entspricht
- Weise dem Feld der Spalte „Auftragsnummer“ den Wert des Attributs *Auftragsnummer* des aktuellen Elements zu
- Weise dem Feld der Spalte „Identifikationsnummer“ den Wert des Attributs *ID* des aktuellen Elements zu
- Weise dem Feld der Spalte „Materialnummer“ den Wert des Attributs *Materialnummer* des aktuellen Elements zu
- Weise dem Feld der Spalte „Anfangszeitpunkt“ den Wert des Attributs *frühs-terAnfangszeitpunkt* des aktuellen Elements zu
- Weise dem Feld der Spalte „Endzeitpunkt“ die aktuelle Simulationszeit zu
- Weise dem Feld der Spalte „Details“ die Tabelle *Historie* des aktuellen Elements zu
- Weise dem Feld der Spalte „Enthaltene Komponenten“ die Tabelle *Enthalten-Komponenten* des aktuellen Elements zu
- Erhöhe den Wert der globalen Variable *ZeileDerEndtabelle* um eins

Als letztes ruft der Ereignisverwalter die Methode Endsim auf. Mit ihr werden die einzelnen an den Stationen und Mitarbeitern erfassten Statistiken in eine Tabelle übertragen und daraus Auslastungsdiagramme erzeugt.

### 5.4.3 Verifikation und Validierung des ausführbaren Modells

Um das implementierte Simulationsmodell zu verifizieren und zu validieren werden mehrere der in Abschnitt 2.3.3 aufgeführten Techniken durchgeführt. Als erstes eignet sich ein Test von Teilmodellen, bei dem die einzelnen Bausteine mit ihrem Verhalten überprüft werden. Die Bausteine werden dabei wie in Abbildung 5-10 – 5-14 dargestellt aufgebaut und die Quelle und Senke werden an die jeweiligen Lagerplätze angeschlossen. Durch den abgegrenzten Teilbereich kann das richtige Ausführen der Steuerungen in einem überschaubareren Rahmen ausgetestet werden. Dieses Vorgehen erlaubt es Fehler an den Bausteinen zu beheben, bevor sie miteinander verbunden werden.

Da das Werkzeug Plant Simulation eine Animation der beweglichen Elemente und Mitarbeiter erlaubt, kann außerdem ein Test durch Animation durchgeführt werden. Dieser kann sowohl bei den einzelnen Teilmodellen aber auch bei dem Gesamtmodell erfolgen. Durch die Animation wird schnell ersichtlich, ob die beweglichen Elemente und Transportmitarbeiter den richtigen Weg nehmen. Das Verhalten des Systems, das mit der Animation überprüft wurde, kann mit Hilfe der Historie der beweglichen Elemente weiter analysiert werden. Dazu wird das System gestoppt und stichpunktartig die Daten von den beweglichen Elementen überprüft. Dabei werden sowohl der Verlauf durch das Sys-

tem als auch die enthaltenen Elemente geprüft. Außerdem werden die verwendeten Parameter wie etwa die durchlaufenen Bearbeitungsstationen mit ihren Bearbeitungszeiten überprüft.

Bei einem anschließenden Grenzwerttest wird dann das Verhalten in Grenzfällen getestet. Dazu gehören die Eingabe von falschen Datentypen oder großen Datenmengen. Zusätzliche Abfragen, Dialoge oder Abbruchbedingungen erzielen dann ein sicheres Bedienen. Ein solches Vorgehen ist beispielsweise bei der falschen Eingabe von Materialnummern in der Auftragsliste notwendig. Wird eine Materialliste gefordert, die nicht in der Stückliste vorhanden ist, wird die Simulation gestoppt und ein Dialogfenster öffnet sich.

Außerdem erfolgt wieder ein strukturiertes Durchgehen, bei dem die Funktionen, die zu erbringen sind, mit dem ausführbaren Modell abgeglichen werden. Dies stellt sicher, dass alle Anforderungen erbracht werden. In Tabelle 5-20 sind zu den in der Zielbeschreibung geforderten Funktionen die entsprechenden Elemente des ausführbaren Modells zugeordnet.

**Tabelle 5-20** Ergebnisse des strukturierten Durchgehens des ausführbaren Modells

<b>Funktionen/Aufgaben</b>	<b>Darstellung im ausführbaren Modell</b>	<b>Plausibilität</b>
• Aufnahme und Speicherung der Traceabilitydaten	• Datendefinition in Abschnitt 5.4.1. beschreibt die benötigten Formate und Datentypen, die durch das im vierten Kapitel beschriebene Traceabilitysystem erfüllt werden müssen	✓
• Übertragung der Daten des aktuellen Zustands (aus Traceabilitysystem) in Simulationsmodell	• Datenformate (5.3.2) und Schnittstellen (5.4.2) sind beschrieben • Übertragung wird mit beschriebener Init-Methode aufgerufen	✓
• Abbildung der Vorgänge in der Produktion	• Animation der definierten Bausteine ermöglicht anschauliche Darstellung	✓
• Prognose wann sich welches Objekt wo in der Fabrik befindet	• Erfolgt für jedes Element individuell durch den Datensatz Historie	✓
• Variationsmöglichkeiten über Experimente	• Eingabemöglichkeiten (vgl. 5.3.4) erlauben die schnelle Eingabe der Daten	✓
• Auswertung der Experimente	• Ergebnisdaten (5.3.4) werden mit der Steuerung (5.4.2) erzeugt und erlauben das schnelle Erfassen der wichtigsten Daten	✓

## 6 Umsetzung des Konzepts

Im Anschluss an die allgemeine Konzeptionierung des Simulationsmodells erfolgt die Erprobung anhand eines ausgewählten Beispiels. Dazu wird zunächst ein passender Produktionsbereich ausgewählt. Darauf aufbauend erfolgt die Modellierung nach dem entwickelten Konzept. Systematisch ausgeführte Simulationsläufe werden ausgewertet und dadurch Optimierungsbedarfe ermittelt. Am Ende des Kapitels erfolgt sowohl eine Bewertung des umgesetzten Simulationsmodells als auch ein Fazit über das entwickelte Gesamtkonzept.

Dabei sei darauf hingewiesen, dass das Simulationsmodell im Anwendungsbeispiel eine Reihe von Anpassungen benötigt, da dieses ohne das vorgeschaltete Traceabilitysystem und daher ohne die aus ihr ermittelte Anfangsbelegung umgesetzt wird. Dies liegt daran, dass die Umsetzung des Systems und die Implementierung der Schnittstelle im Rahmen des Umfangs dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

### 6.1 Vorstellung des exemplarischen Produktionsbereichs

Der Fokus der Umsetzung liegt auf der Darstellung der Potentiale des entwickelten Konzepts. Daher ist die Auswahl eines Fertigungsbereichs, der alle identifizierten Prozessstypen beinhaltet, sinnvoll. Um die Simulation dennoch überschaubar zu halten und den Komplexitätsgrad gering zu halten, sollte kein zu großes System gewählt werden, weswegen neben der Auswahl auch eine Vereinfachung des Systems erfolgt. Im Anschluss werden die Aufnahme und Aufbereitung der notwendigen Daten für das Simulationsmodell erläutert.

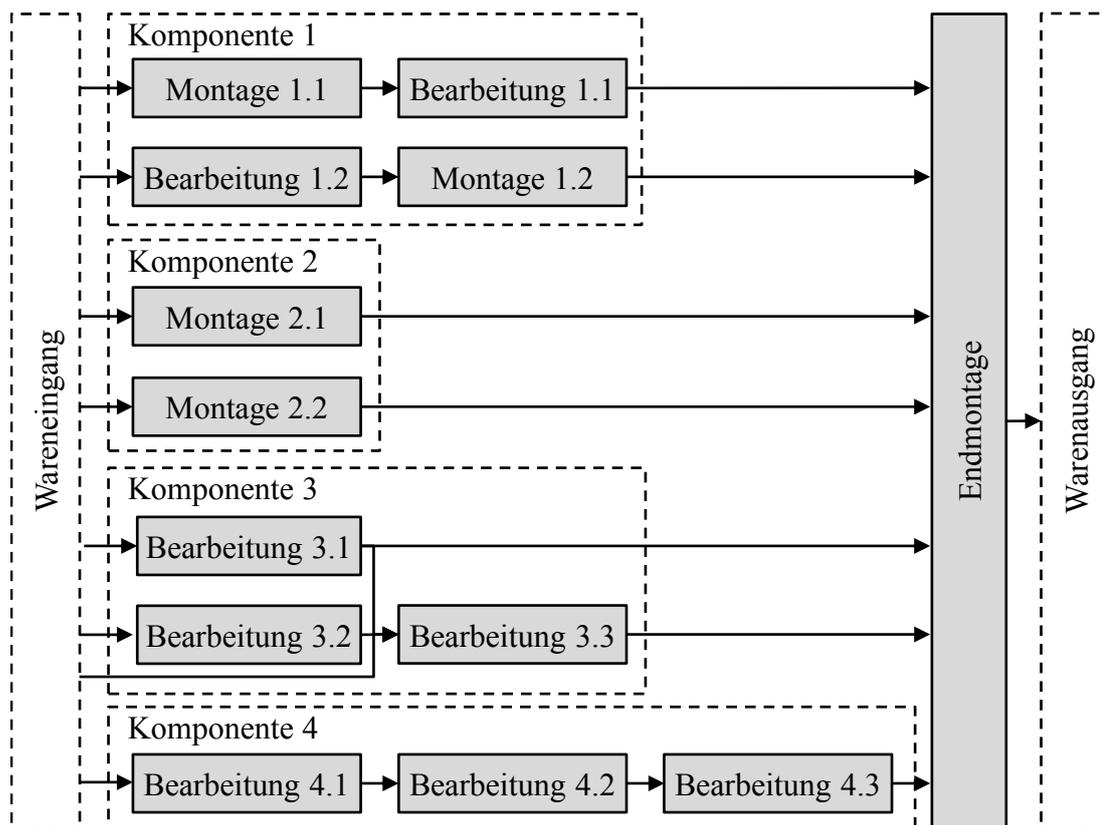
#### 6.1.1 Auswahl und Vereinfachung des Produktionsbereichs

Als Produktionsbereich wird eine Endmontagelinie mit den zugehörigen vorgelagerten Prozessen betrachtet. Das hat zwar den Nachteil, dass die Vorprozesse teilweise auch für andere Endmontagelinien produzieren und dieses Verhalten vereinfacht mit in der Simulation abgebildet werden muss. Der deutliche Vorteil ist allerdings, dass zwar alle notwendigen Prozessarten, die im Konzept definiert sind, dargestellt werden, der Komplexitätsgrad aber so gering wie möglich gehalten wird. Die Auswahl einer Endmontagelinie, die eine geringe Anzahl an unterschiedlichen Endprodukten und eine geringe Varianz bei den Vorprozessen besitzt, unterstützt dieses Bestreben zusätzlich.

Die Daten müssen für das Modell manuell beschafft werden, da nicht auf ein Traceabilitysystem und die damit verbundene Datenschnittstelle zurückgegriffen werden kann. Diese Datenerhebung erzeugt einen zusätzlichen Aufwand bei der Erstellung und bei der Ausführung des Modells. Um diesen Aufwand gering zu halten, werden zwei grundlegende Vereinfachungen am betrachteten Bereich durchgeführt.

Als erstes werden die Komponenten, die an der ausgesuchten Endmontagelinie betrachtet werden, eingegrenzt. Dazu werden die ursprünglich 300 unterschiedlichen Endprodukte mit Hilfe einer ABC-Analyse der Produktionsmenge auf 69 verringert. Diese 69 Endprodukte machen 80 Prozent der Produktionsmenge des letzten Kalenderjahres aus.

Die 69 betrachteten Endprodukte besitzen generell zwei verschiedene Ausprägungen, die im Folgenden Typ A und Typ B genannt werden. Die Produkte des Typs A bestehen aus ungefähr 50 verschiedenen Komponenten, wohingegen der Typ B sich aus 200 unterschiedlichen Komponenten zusammensetzt. Die zweite Vereinfachung für das Simulationsmodell ist daher die Eingrenzung der betrachteten Komponenten auf Hauptkomponenten, wie sie in Abschnitt 4.1.1 definiert wurden. Beide Typen bestehen aus den gleichen drei Hauptkomponenten, allerdings haben die Endkomponenten des Typs B zusätzlich noch eine vierte Hauptkomponente. Die Hauptkomponenten werden im Folgenden als Komponente 1-4 bezeichnet. Sie beschreiben jeweils eine Art von Hauptkomponente, wie etwa einen Motor oder ein Gehäuse, die in unterschiedlichen Ausführungen und Bauformen produziert werden.



**Abbildung 6-1** Schematischer Materialfluss

Die Prozessschritte, die die Hauptkomponenten durchlaufen, sind im schematischen Materialfluss in Abbildung 6-1 dargestellt. Die einzelnen Prozessschritte können den vier verschiedenen Komponenten eindeutig zugeordnet werden, da die Stationen jeweils nur von einer Komponentenart durchlaufen werden. Die Hauptkomponenten können

parallel gefertigt werden und lagern dann solange in einem Lager vor der Endmontage bis sie kommissioniert werden.

Der Auftragsentkopplungspunkt liegt in dem betrachteten Produktionsbereich in der Kommissionierung, da sie die Aufträge entsprechend der Auftragsreihenfolge aus dem Lager, das hier Supermarkt genannt wird, entnimmt. Die einzelnen Komponenten der Vorprozesse werden anhand einer prognostizierten Liefervorschau gefertigt.

### 6.1.2 Datenaufnahme und -aufbereitung

Wie bereits im Rahmen des Konzeptmodells beschrieben, müssen eine Reihe von Systemdaten, wie etwa Stammdaten, aus der Produktion beschafft werden, damit das System modelliert werden kann. Mit Hilfe der Materialnummern der 69 betrachteten Endprodukte können sowohl die Daten für die Arbeitspläne, als auch für die Stücklisten aus dem ERP-System beschafft werden.

Für die Stückliste werden die Materialnummern der Hauptkomponenten für jedes Endprodukt ermittelt und in die in Abschnitt 5.3.1 beschriebene Form gebracht. Für den Arbeitsplan müssen die Prozesse und Bearbeitungsparameter zu jedem Endprodukt ermittelt werden. Dazu gehören die Bearbeitungszeit, also die Grundzeit und die Rüstzeit, sowie die Änderung der Materialnummer bei dem jeweiligen Prozess. Da für den betrachteten Bereich keine vollständigen Daten über die Rüstzeiten von allen Prozessen vorhanden sind, muss eine alternative Lösung für die fehlenden Daten gefunden werden. Statt der Abschätzung von fehlenden Rüstzeiten werden alle Rüstzeiten im Modell vernachlässigt. Dies ist zulässig, weil die Rüstzeiten verglichen mit anderen Einschränkungen der Verfügbarkeit vernachlässigbar kurz sind. Zu diesen Einschränkungen zählt beispielsweise die Auslastung durch andere Endmontagelinien, die teilweise bis zu 70 Prozent der Prozesszeit betragen kann. Dies ist auch der Grund dafür, dass keine Störungsdaten über die Prozesse in der Simulation abgebildet werden. Diese werden mit dem Verfügbarkeitsverhalten, welches in Abschnitt 6.2.2 detaillierter beschrieben wird, vereinfachend dargestellt.

Für die Bearbeitungs- und Montagestationen muss der Einfluss der Mitarbeiterzahl ermittelt werden. In dem betrachteten Bereich ist lediglich bei der Endmontage eine unterschiedliche Mitarbeiterzahl möglich und an den anderen Stationen arbeitet jeweils ein Mitarbeiter. Dabei wird der Einfluss der Mitarbeiter bei der Endmontage mit bis zu drei Mitarbeitern mit Hilfe von Formel (1) abgebildet.

$$\text{Bearbeitungszeit} = \frac{\text{Grundzeit}}{\text{Mitarbeiteranzahl}} \quad (1)$$

Außerdem muss die Reihenfolge, in der die Prozessschritte durchlaufen werden, vermerkt werden, damit für jeden Prozessschritt einer Komponente die jeweils nächste Komponente bekannt ist. Insgesamt entsteht durch die gewonnenen Daten eine detail-

lierte Produkt-Prozess-Matrix. Dieser können dann alle Daten für den Arbeitsplan, wie er in Abschnitt 5.3.1 definiert wurde, entnommen werden.

Damit die Transportprozesse richtig im Modell wiedergegeben werden, müssen durchschnittliche Transportgeschwindigkeiten sowie Auf- und Abladezeiten erhoben werden. Vereinfachend wird als Transportgeschwindigkeit  $5 \frac{m}{s}$  angenommen, da dies eine realistische Geschwindigkeit für Gabelstapler ist. Die Auf- und Abladezeiten werden mit 2 *min* und einem stochastischen Verhalten mit einer negativen Exponentialverteilung mit einer unteren Schranke von 1 *min* und einer oberen Schranke von 3 *min* angenommen. Diese Verteilungsfunktion eignet sich für die Abbildung solcher Zeitdauern, da Zeiten zwischen unabhängigen Ereignissen dargestellt werden können. Diese Werte sind für den reinen Auf- und Abladevorgang relativ hoch gewählt, jedoch werden durch sie auch andere bzw. sonstige Tätigkeiten wie Absprachen, Umpackvorgänge oder Ähnliches abgebildet.

Bei den Kommissioniervorgängen müssen zudem noch die durchschnittlichen Kommissionierzeiten pro Losgröße aufgenommen werden. Abhängig davon, wie viele Regalwagen kommissioniert werden, erhöht sich die Kommissionierdauer, weswegen vereinfachend von einer durchschnittlichen Kommissionierdauer von 25 *min* pro Regalwagen ausgegangen wird. Da durchschnittlich eine Losgröße von 50 auf einem Regalwagen kommissioniert wird, kann die Kommissionierdauer durch Formel (2) berechnet werden.

$$\text{Kommissionierdauer} = (\text{Losgröße} \div 50) \times 25 \text{ min} + 25 \text{ min} \quad (2)$$

Dabei wird, genau wie bei den Auf- und Abladezeiten, eine negative Exponentialverteilung für das stochastische Verhalten gewählt, bei der die untere Schranke der Kommissionierdauer -5 *min* und die obere Schranke der Kommissionierdauer +5 *min* beträgt.

Für die Beschaffung der Weglängen und der Anordnung und Lage der Lagerplätze und Arbeitsstationen erfolgt entweder eine Begehung vor Ort oder die Aufnahme der Abmessung anhand eines Grundrisses. Nachdem alle notwendigen Lagerorte identifiziert worden sind, erfolgt für die Lagerplätze im Supermarkt eine Zuordnung der Materialnummern zu den Lagerorten. Die restlichen Lagerorte werden durch die Angabe des Zielorts im beweglichen Element bestimmt und sind daher in der Tabelle nicht mitzuführen.

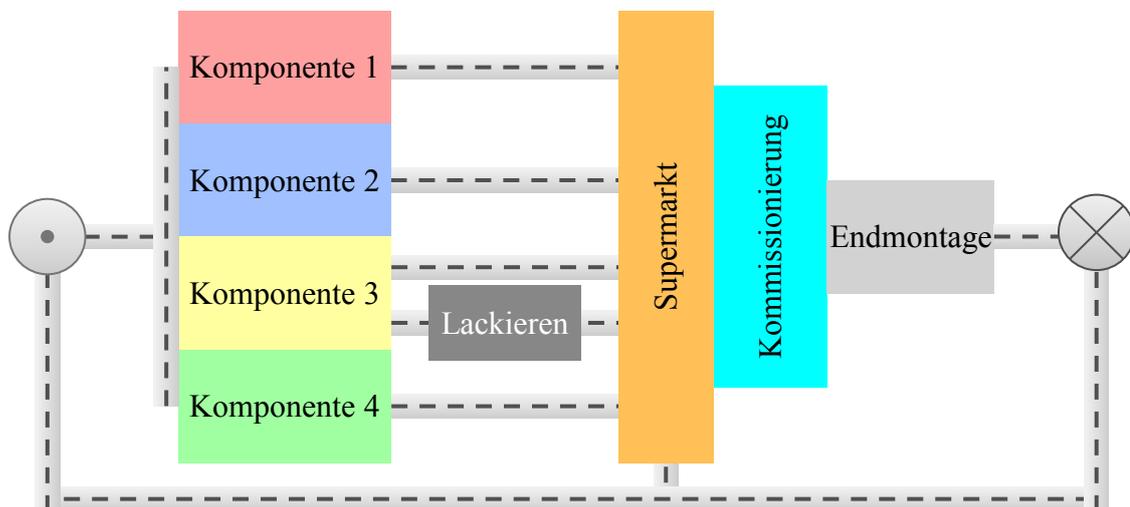
Um die so gewonnenen Daten für das Simulationsmodell nutzbar zu machen, müssen sie dann in die in Abschnitt 5.3 erläuterte Form gebracht werden. Dazu muss sichergestellt werden, dass die Daten in den richtigen Datentypen vorliegen und die Einheiten den Vorgaben entsprechen.

## 6.2 Erstellung des Simulationsmodells

Nach der Beschreibung und Definition des exemplarischen Produktionsbereichs und der notwendigen Daten, wird das Simulationsmodell erstellt. Dazu wird die Modellierung in Plant Simulation beschrieben, wobei alle verwendeten Bausteine analog zum Konzept in Abschnitt 5.4 implementiert worden sind. Sie weisen demnach die beschriebenen Funktionen auf, wie etwa die Aufnahme der Statistik, die Beschreibung der Datensätze der einzelnen beweglichen Elemente oder auch das Verhalten der Bausteine. An den Stellen, an den Abweichungen oder Vereinfachungen notwendig sind, werden diese dargestellt. Die Veränderungen, die für das Modell notwendig sind, weil es ohne Schnittstelle zum Traceabilitysystem umgesetzt wird, werden, nachdem das Gesamtmodell beschrieben wird, detailliert in einem eigenen Abschnitt erläutert.

### 6.2.1 Modellierung der Prozesse

Für das Simulationsmodell erfolgt der Aufbau der Komponenten, wie in Abbildung 6-2 schematisch dargestellt. Ein Bild des gesamten Modells ist im Anhang in Abbildung 8-1 dargestellt. Das Modell ist grundsätzlich in unterschiedliche Bereiche unterteilt, die durch den zentralen Transport verbunden werden. Dieser ist in Abbildung 6-2 durch Wege zwischen den einzelnen Bereichen dargestellt. Zu den Bereichen gehören neben den Vorprozessen, in denen die Hauptkomponenten gefertigt werden, ein Supermarkt, in dem die Teile vor der Endmontage lagern, die Kommissionierung sowie die Endmontage.

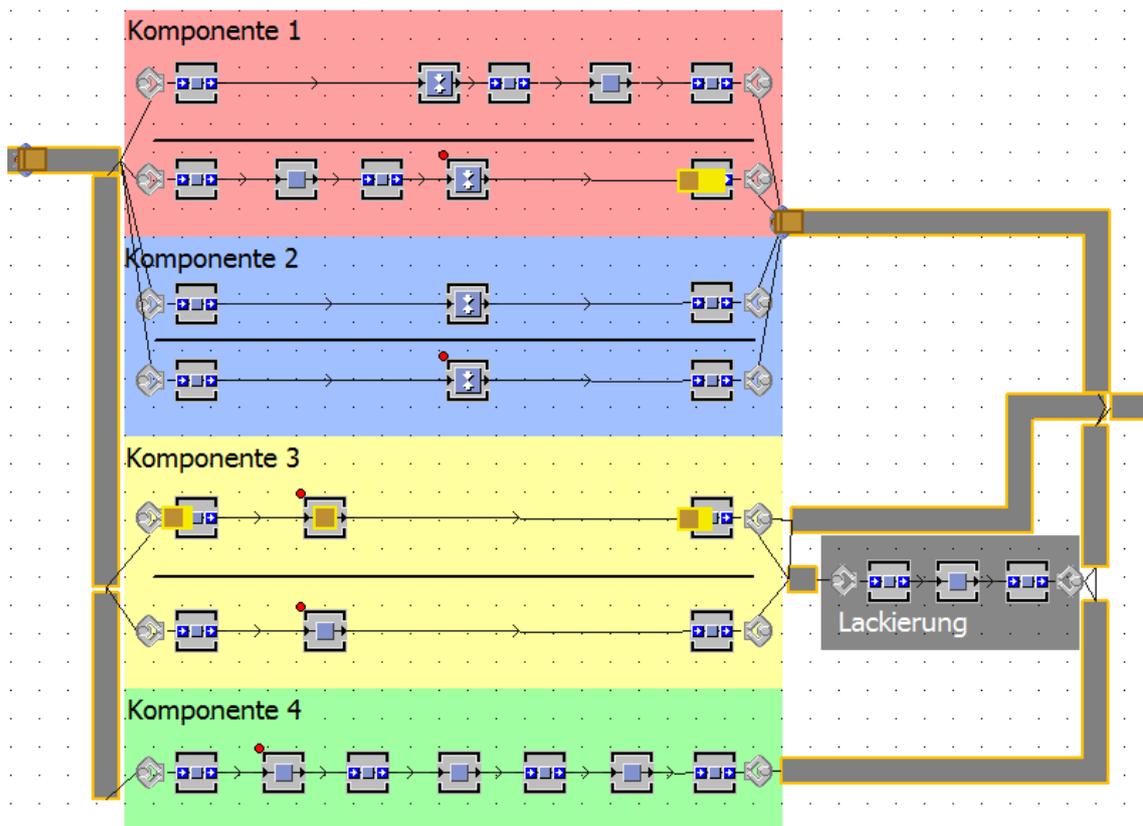


**Abbildung 6-2** Grundlegender Aufbau des Simulationsmodells

Da eine klare Zuordnung der unterschiedlichen Prozesse zu den vier Komponenten erfolgen kann, wie durch den Materialfluss in Abbildung 6-1 deutlich wird, werden diese auch im Simulationsmodell entsprechend gruppiert. Innerhalb dieser vier Bereiche sind die Prozesse benachbart, weswegen kein Transport durch die zentrale Logistik zwischen den unterschiedlichen Prozessschritten erfolgt. Das Lackieren liegt in der realen Pro-

duktion weiter entfernt und wird daher durch die zentrale Logistik beliefert. Die Kommissionierung erfolgt direkt im Supermarkt und bringt die Elemente in die Endmontage, weswegen kein Transport der zentralen Logistik zwischen diesen Bereichen erfolgt.

Von der Endmontage werden die Teile von der zentralen Logistik abtransportiert und in den Warenausgang bzw. zur Senke gebracht. Dabei ist in dem ausgewählten Produktionsbereich der Wareneingang am gleichen Ort wie der Warenausgang, weswegen kein Abstand zwischen Quelle und Senke bestehen darf. Im Modell müsste der Produktionsbereich daher eigentlich im Kreis angeordnet sein, dies ist jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht sinnvoll. Stattdessen erfolgt die Verbindung zwischen Quelle und Senke durch einen Weg ohne eine Weglänge. An diesem Punkt sei darauf hingewiesen, dass das Verhältnis der dargestellten Weglängen zueinander nicht dem der realen Weglängen zueinander entspricht. Dies liegt daran, dass die Darstellung der Wege im Modell unabhängig von deren Attribut *Weglänge* ist.



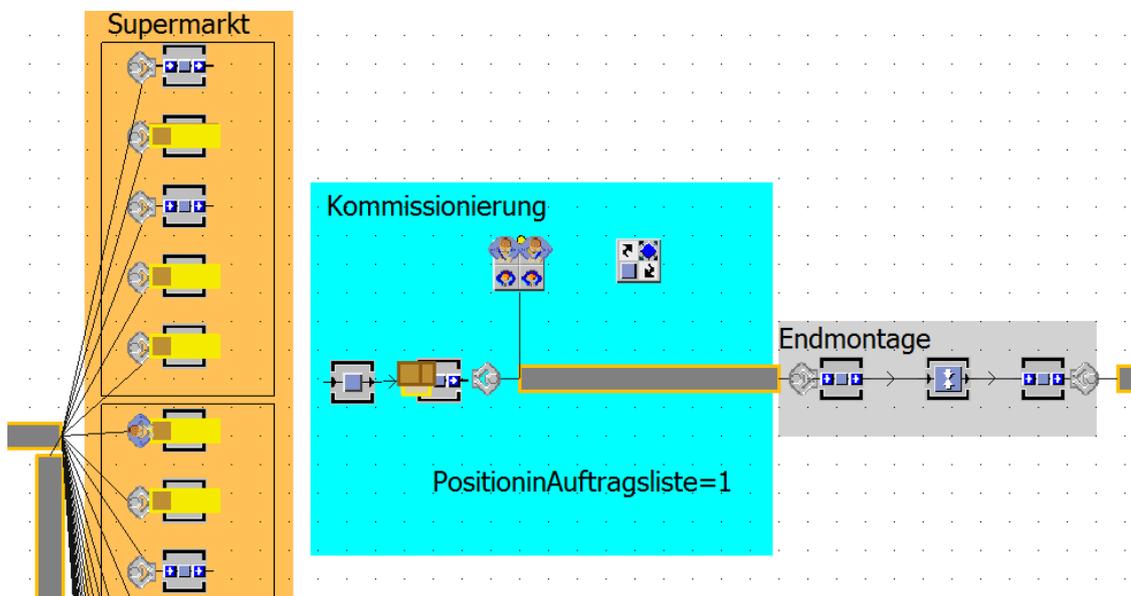
**Abbildung 6-3** Darstellung der Vorprozesse in Plant Simulation

Die Vorprozesse mit ihrem Anschluss an die Transportprozesse werden, wie im Ausschnitt aus dem realen Simulationsmodell in Abbildung 6-3 dargestellt, modelliert. Die einzelnen Prozessschritte haben jeweils einen Lagerplatz am Eingang und am Ausgang, der von den Transportprozessen beliefert wird. Innerhalb der Bereiche erfolgt die Weitergabe über Kanten, da die Prozesse benachbart liegen. Da nur die Hauptkomponenten betrachtet werden, ist die erforderliche Montage nur vereinfachend dargestellt. Sie wird

mit einem Lagerplatz am Eingang und ohne die Montagesteuerung, wie sie im fünften Kapitel dargestellt wurde, abgebildet und lässt sich daher nur durch das Symbol des Bausteins unterscheiden. Genau wie bei den Bearbeitungsstationen wird der Prozess lediglich durch die Bearbeitungszeit und die Änderung der Materialnummer abgebildet.

Bei der Gestaltung der Transportwege wird eine Vereinfachung gewählt, da die Arbeitsstationen, die nah beieinander liegen, im Modell durch den gleichen Weg beliefert werden. In Abbildung 6-3 wird dies durch die Kanten der Arbeitsplätze, die zum gleichen Punkt des Weges gehen, erkennbar. Diese Vereinfachung ist möglich, da die geringen Abweichungen der Transportzeit im Verhältnis zu den anderen, den Transport beeinflussenden, Zeiten gering ist. Um diese Differenzen dennoch darzustellen, wird die Dauer der Auf- und Abladezeit mit stochastischem Verhalten, wie in Abschnitt 6.1.2 dargestellt, abgebildet.

Der Supermarkt, in den die fertiggestellten Komponenten aus den Vorprozessen geliefert werden, besteht aus einer Vielzahl von Lagerplätzen, die vom Transport beliefert werden. Jeder Lagerplatz entspricht in diesem Anwendungsfall einer Materialnummer, weswegen, wie in dem Ausschnitt aus dem Modell in Abbildung 6-4 dargestellt, eine Vielzahl an Lagerplätzen vorhanden ist. Die Kommissionierung wird mit einem eigenen Mitarbeiter und einem Weg dargestellt. Dabei sind die Mitarbeiter hier von einem anderen Typ als die der zentralen Logistik und vermischen sich nicht, da davon ausgegangen wird, dass ihre Aufgabenfelder klar getrennt sind.



**Abbildung 6-4** Darstellung von Supermarkt, Kommissionierung und Endmontage

Die Endmontage ist ebenfalls vereinfacht dargestellt. Statt der Modellierung, wie im Rahmen des Konzepts in Abschnitt 5.4 beschrieben, wird sie hier als einfacher Baustein mit nur einem Lagerplatz davor modelliert. Dies liegt daran, dass die für die Montage benötigten Komponenten im realen Fall vorkommissioniert werden. Im Simulationsmo-

dell kann der in der Kommissionierung erstellte Ladungsträger daher einfach weitergegeben werden. Auf der Montagestation verweilen diese dann die entsprechende Bearbeitungszeit und werden danach umgelagert. Wenn das gesamte Los auf dem Ladungsträger hinter der Montage liegt, wird es vom zentralen Transport zur Senke gebracht und dort vernichtet.

### 6.2.2 Anpassung und Vereinfachungen des Ablaufverhaltens

Zusätzlich zu dem Verhalten, das im Rahmen des Konzepts bereits in Kapitel 5 beschrieben wurde, müssen einige Anpassungen und Vereinfachungen für die Umsetzung erfolgen, damit das Simulationsmodell trotz der fehlenden Schnittstelle zum Traceabilitysystem sinnvolle Ergebnisse liefert.

Da keine Daten für eine Liefervorschau vorliegen, wird diese hier vereinfachend anhand der Auftragsliste erstellt. Dazu werden Aufträge mit den gleichen Materialnummern zusammengefasst und in die Lieferliste geschrieben. Diese enthält eine Liste an Endprodukten und der Anzahl, in der sie insgesamt in der Auftragsliste vorkommen. Die Quelle erzeugt dann mit Hilfe der Methode WE Eingangssteuerung die notwendigen Komponenten, die für das entsprechende Endprodukt benötigt werden. Dazu wird im Simulationsmodell die zusätzliche Tabelle **EingehendeKomponenten** erstellt, welche zu jeder Materialnummer der Endprodukte die Materialnummern der Komponenten, die im Wareneingang erzeugt werden müssen, enthält.

Bei der Erzeugung der unterschiedlichen Komponenten wird jeweils die Gesamtmenge auf einmal erzeugt, sodass sie zum gleichen Zeitpunkt im Lagerplatz der Quelle liegen. Diese Menge bildet dann die Losgröße, die bis zum Supermarkt zusammen transportiert wird. Dafür wird die Kapazität des Transportmitarbeiters jeweils gleich der Losgröße gesetzt. Das heißt, bei der Entnahme eines Elements von einem Lagerplatz wird dem Mitarbeiter die neue Kapazität, entsprechend des Attributs *Losgröße* des Elements, zugewiesen. In der Kommissionierung wird dem erzeugten Ladungsträger, der die kommissionierten Elemente enthält, eine neue Losgröße zugewiesen. Diese entspricht der Auftragsmenge und wird bis zur Senke verwendet. Generell werden die Losgrößen nur bei den Transporten bzw. Transportvorgängen in der Kommissionierung verwendet. Die Bearbeitungs- und Montagestationen hingegen entnehmen jeweils einzelne Elemente bzw. Ladungsträger vom vorgelagerten Lagerplatz.

Da nur eine Endmontagelinie und davon nur ein Teil der im realen System produzierten Endprodukte gefertigt werden, müssen die Verfügbarkeiten der Stationen angepasst werden. Für die Arbeitsstationen muss, wenn sie noch weitere Produkte bearbeiten, die nicht zu den betrachteten Produkten gehören, deren Zeitanteil an der Prozesszeit ermittelt werden. Dazu werden Auslastungsdiagramme der Stationen benötigt, die eine Übersicht darüber geben, in welchem Anteil die 69 Produkte durchschnittlich von dieser Li-

nie gefertigt werden. Im Simulationsmodell werden diese dann durch stochastische Störungen an der Maschine abgebildet. Da nicht bekannt ist zu welchen Zeitpunkten und wie lange die Stationen andere Produkte bearbeiten, wird eine ungefähre Stördauer und eine exponentialverteilte Abweichung mit einer oberen und einer unteren Schranke angegeben.

Ein wichtiger Schritt ist außerdem die Ermittlung der Einschwingphase, da das Simulationsmodell ohne Anfangsbelegung gestartet wird. Diese kann nicht erfolgen, da ohne passendes Traceabilitysystem keine Echtzeitdaten verfügbar sind und eine direkte Aufnahme der aktuellen Situation zu aufwendig ist. Dies bedeutet, dass die Statistiken in dem Modell nicht ab dem Beginn, sondern erst nach der Einschwingphase aufgenommen werden, da sonst die Statistik den Leerzustand mit einbezieht.

Um diesen nicht repräsentativen Anfangszustand aus der Betrachtung auszuschließen wird die Auftragsreihenfolge vervielfältigt. Wenn sie mindestens dreimal durchlaufen wird kann die Statistik für die in der Mitte ausgeführte Reihenfolge aufgenommen werden. Um dies zu gewährleisten wird in der Methode der Quelle (WE Eingangssteuerung) ergänzt, dass die Statistik erst bei Durchlaufen des ersten Elements der mittleren Auftragsreihenfolge aktiviert wird. Beendet wird die Simulation dann, wenn das letzte Element dieser Auftragsreihenfolge in der Senke vernichtet wird. Diese Vorgehensweise verhindert, dass das System mit einem leeren Zustand endet. Die Methode EndtabelleErzeugen wird deshalb so angepasst, dass beim Vernichten des letzten Elements dieser Reihenfolge die Statistik ausgeschaltet und die Simulation beendet wird.

### 6.3 Durchführung und Auswertung von Experimenten

Die Durchführung und Auswertung erfolgt exemplarisch unter dem Gesichtspunkt der Reduzierung der Durchlaufzeit der Endprodukte und der gesamten Auftragsreihenfolge. Die verwendete Auftragsreihenfolge entspricht dabei realen Aufträgen, die auf der betrachteten Endmontagelinie gefertigt werden. Sie enthält sowohl Endprodukte des Typs A als auch des Typs B und weist ein großes Feld an Losgrößen auf. Der kleinste Auftrag umfasst zwei Produkte, wohingegen der größte eine Losgröße von 660 besitzt. Die detaillierte Auftragsreihenfolge kann Tabelle 8-5 im Anhang entnommen werden.

Um repräsentative Daten aus dem Modell zu erhalten, müssen mehrere Replikationen ausgeführt werden, die verhindern, dass das Modell ein untypisches stochastisches Verhalten zeigt. Daher wird das Simulationsmodell dreimal mit den jeweiligen Experimentdaten ausgeführt und die Ergebnisdaten entsprechen jeweils dem gemittelten Wert.

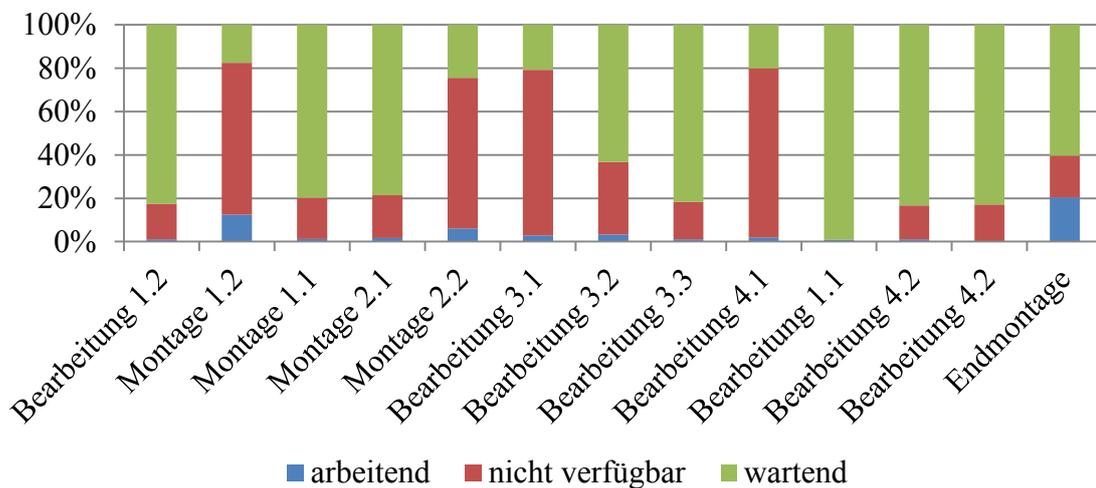
Zu Beginn der Experimente liegen noch keine Erkenntnisse über das Simulationsmodell vor, weswegen die Simulation zunächst mit sinnvoll erscheinenden Eingangsdaten ausgeführt wird. Erst durch die Auswertung der ersten Ergebnisdaten können Erkenntnisse

darüber, welche Werte falsch gewählt wurden, gewonnen werden. Obwohl die Änderung der Auftragsreihenfolge prinzipiell möglich ist, soll dies hier nicht erfolgen, da davon ausgegangen wird, dass diese nach einer Prioritätenliste erstellt wurde, die nicht abänderbar ist. In Tabelle 6-1 sind die Eingabedaten des ersten Versuchs zusammengefasst.

**Tabelle 6-1** Eingabedaten des ersten Versuchs

Parameter	Wert
Logistikmitarbeiter	2
Kommissionierer	2
Mitarbeiteranzahl Endmontage	1
Pufferkapazität	-1 an allen Lagerplätzen (keine Begrenzung der Kapazität)
Schichtsystem	2 Schichten mit 7 Stunden (alle Prozesse und Mitarbeiter)

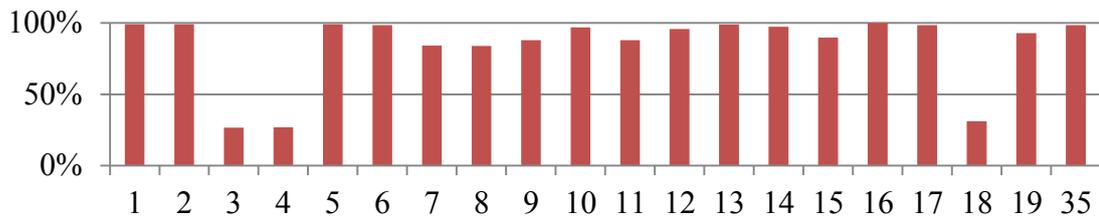
Für den ersten Versuch ergibt sich eine Simulationszeit von 12 Tagen 7 Stunden und 53 Minuten mit einer mittleren Durchlaufzeit der Elemente die bei mehr als drei Stunden liegt. Dabei sind die einzelnen Stationen, wie in Abbildung 6-5 erkennbar, sehr gering ausgelastet. Neben der Zeit, die sie durch andere Prozesse ausgelastet werden und nicht verfügbar sind, besitzen sie einen großen Zeitanteil, in dem sie auf Objekte warten. Daher kann im ersten Schritt davon ausgegangen werden, dass die Stationen keinen Engpass im System bilden und dieser an einem anderen Punkt liegt.



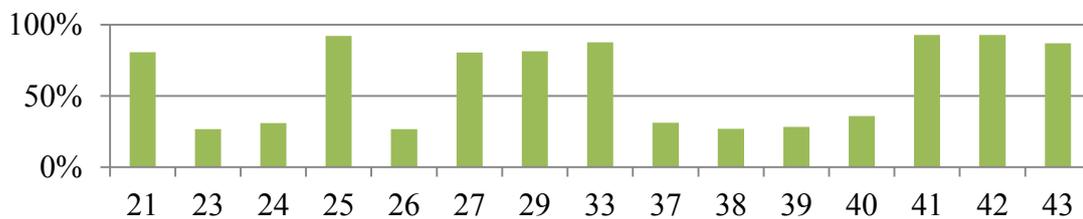
**Abbildung 6-5** Auslastungsdiagramm der Arbeitsstationen in Versuch 1

Mithilfe der Statistiken zu den Lagerplätzen kann ermittelt werden, an welchen Stellen viele Komponenten durchlaufen und wo diese lange lagern. Diese Informationen sind für die Minimierung der Durchlaufzeit, welche im Fokus steht, nur begrenzt nützlich. In Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7 ist der Zeitanteil, in der die Lagerplätze der Vorprozesse und des Supermarkts leer stehen, dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die La-

gerplätze der Vorprozesse einen hohen Zeitanteil unbelegt sind, wohingegen die Lagerplätze im Supermarkt im Mittel längere Zeit belegt sind. Dies deutet darauf hin, dass der Bereich der Kommissionierung eine zu geringe Kapazität besitzt. Die Lagerplätze sind in den beiden Diagrammen der Übersichtlichkeit halber durchnummeriert. Die Zuordnung der Lagerplatznummern zu den entsprechenden Lagerplatzbezeichnungen befindet sich im Anhang, in Tabelle 8-6.

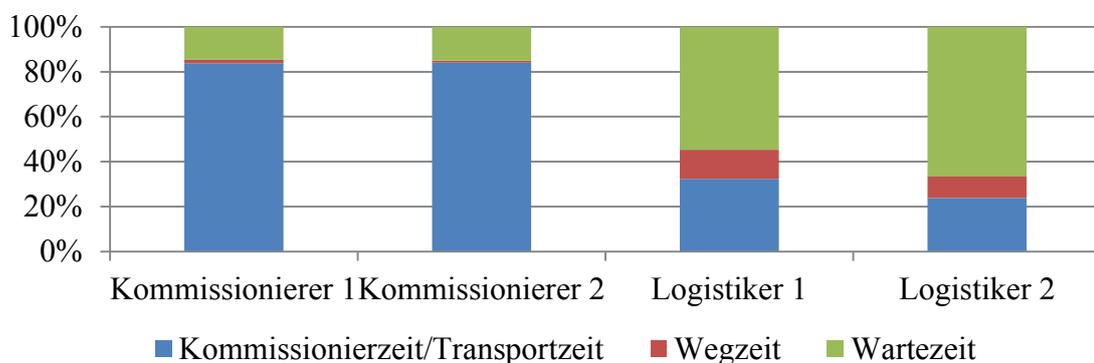


**Abbildung 6-6** Leeranteil der Lagerplätze der Vorprozesse in Versuch 1



**Abbildung 6-7** Leeranteil der Lagerplätze im Supermarkt in Versuch 1

Die ungleichmäßige Auslastungsverteilung der Kapazitäten zeigt sich auch in Abbildung 6-8. Diese stellt die Auslastung der Mitarbeiter in den Transportprozessen in Versuch 1 dar. Die Kommissionierer haben eine Auslastung von über 80 Prozent, wohingegen die Logistiker deutlich geringer ausgelastet sind. Dies deutet darauf hin, dass der Engpass nicht in den Vorprozessen, sondern eher im Bereich der Kommissionierung oder auch der Endmontage liegt.

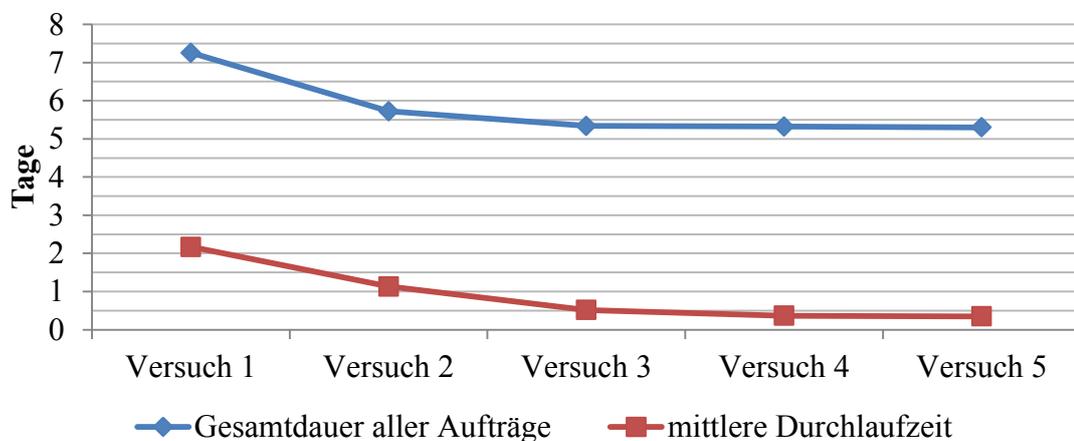


**Abbildung 6-8** Auslastung der Mitarbeiter in Versuch 1

Im Folgenden wird daher mit Hilfe einer Reihe von weiteren Versuchen überprüft, ob die Durchlaufzeit durch eine höhere Anzahl an Kommissionierern gesenkt werden kann.

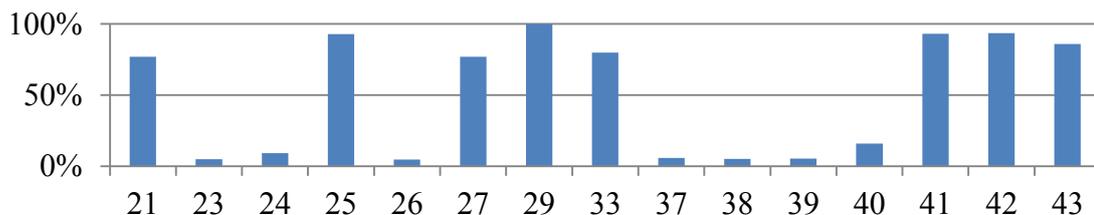
Daher wird die Anzahl der Kommissionierer für jeden Versuch um eins erhöht. Das Resultat dieser Versuche ist in Abbildung 6-9 (Versuche 1 bis 4) dargestellt und zeigt, dass die Anzahl der Kommissionierer einen deutlichen Einfluss auf die Durchlaufzeit hat. Der Verlauf zeigt aber auch, dass die Abnahme der Durchlaufzeit bei einer Anzahl von fünf Kommissionierern nahezu stagniert.

Als zusätzlicher Parameter für den nächsten Versuch wird daher die Änderung der Mitarbeiterzahl in der Endmontage gewählt, um deren Auswirkung auf die Durchlaufzeit zu ermitteln. Der fünfte Versuch wird mit zwei Mitarbeitern in der Endmontage und fünf Mitarbeitern in der Kommissionierung ausgeführt. Das Ergebnis zeigt, dass die Zeit zwar gesenkt werden kann, die Zeitersparnis jedoch nur sehr gering ist. Die weitere Betrachtung erscheint demnach nicht sinnvoll.



**Abbildung 6-9** Verlauf der Durchlaufzeiten über die durchgeführten Versuche

Um zu ermitteln wie der fünfte Versuch weiter verbessert werden kann, wird für ihn die Auslastung der Lagerplätze im Supermarkt betrachtet. Ein Vergleich von Abbildung 6-10, die den Leeranteil der Lagerplätze im Supermarkt während des fünften Versuchs zeigt, mit dem aus dem ersten Versuch in Abbildung 6-7, zeigt eine Veränderung der Lagerplatzbelegung. Die Lagerplätze, die vorher bereits schon einen hohen Leerstand zeigten stehen nun anteilig noch länger leer. Die Lagerplätze hingegen, die nur kurze Zeit unbelegt waren, zeigen in Versuch fünf eine noch kürzere Belegungszeit.



**Abbildung 6-10** Leeranteil der Lagerplätze im Supermarkt in Versuch 5

Diese Abweichung deutet darauf hin, dass die Kapazität der Stationen und Mitarbeiter nicht weiter optimiert werden kann. Benötigte Objekte stehen zu den erforderlichen Zeitpunkten nicht zur Verfügung. Andere Objekte, die mit ihnen kommissioniert werden und die Kommissionierer müssen daher warten bis diese verfügbar sind.

Die einzigen Parameter, um das System sinnvoll zu ändern und die Durchlaufzeit zu verringern, sind die Veränderung der Auftragsreihenfolge und die Lieferreihenfolge im Wareneingang. Da diese beiden Aspekte jedoch im Rahmen des Beispiels als feste Größen von außen vorgegeben werden, kann die Durchlaufzeit an dieser Stelle durch Experimente an dem Simulationsmodell nicht sinnvoll weiter optimiert werden.

## 6.4 Bewertung des Simulationsmodells

Obwohl das Simulationsmodell an vielen Stellen starke Vereinfachungen nutzt und dementsprechend der Grad an Detaillierung gering ist, kann deutlich erkannt werden, welches Potential in ihm steckt. Das Modell gibt zwar keine präzisen belastbaren Werte, zeigt aber das generelle Verhalten und lässt Rückschlüsse auf die Bedarfe der einzelnen Bereiche zu. So geben die ermittelten Ankunftszeiten und Durchlaufzeiten generelle Tendenzen abhängig von den gewählten Parametern und geben damit eine gute Orientierung zur Verbesserung des Systemverhaltens.

Durch die Wahl einer einzelnen Endmontagelinie kann so beispielsweise ermittelt werden, wie viele Mitarbeiter für diese ungefähr im Transport benötigt werden. Dies ist oftmals in der Realität nicht einfach bestimmbar, weil viele Linien durch dieselben Mitarbeiter bedient werden. Daher fehlt oft eine Übersicht über die Arbeitsverteilung und die Auslastung der einzelnen Mitarbeiter. Bei den Arbeitsstationen des Modells können Prognosen zur Auslastung und zu Zeitpunkten mit freier Kapazität gemacht werden, die ebenfalls in der Realität nur schwer voraussagbar wären.

Die Experimente, die an dem Modell in Abschnitt 6.3 durchgeführt werden, zeigen dabei nur einen Ausschnitt der möglichen Parametervariationen. Neben den ausgeführten Simulationsläufen sind noch eine Reihe weiterer Versuche mit anderen, noch nicht betrachteten, Parametern möglich. Dies hängt auch von der gewählten Zielsetzung ab. Beispielsweise könnte sich für das gewählte Ziel der Durchlaufzeitminimierung eine Änderung des Schichtsystems eignen. Statt im Modell das Schichtsystem so auszuwählen, dass es dem der Realität entspricht, könnten Änderungen im Modell erprobt werden. Dazu kann sowohl eine Änderung des gesamten Schichtsystems für alle Mitarbeiter und Stationen vorgenommen werden oder aber vereinzelt Stationen und Mitarbeiter bekommen individuelle veränderte Schichtsysteme zugewiesen. Mit Hilfe der gespeicherten Daten können die individuellen Durchlauf- und Verweilzeiten der einzelnen Komponenten auf den jeweiligen Stationen und Lagerplätzen detailliert analysiert wer-

den. Außerdem können Kapazitäten variiert und so Kapitalbindung durch unnötige Umlaufbestände vermieden werden.

Als Verbesserung für die Genauigkeit des Modells ist im ersten Schritt eine Erweiterung um weitere Endmontagelinien sinnvoll. Mit dieser werden dann die Verfügbarkeiten der Maschinen besser dargestellt und so die Simulation wesentlich genauer. Diese Erweiterungen können mit Hilfe des Simulationsmodells leicht umgesetzt werden, da die einzelnen Bausteine einfach in derselben Form verwendet werden können. Die einzige Restriktion ist dabei der hohe Aufwand, der durch die Aufnahme, Aufbereitung und Aktualisierung der Daten anfällt.

Insgesamt bietet das Modell, trotz der Abgrenzung auf einen limitierten Bereich und die vorgenommenen Vereinfachungen, eine hohe Aussagekraft.

## 6.5 Fazit des Konzepts

Die durch das Konzept zu erreichende Verbesserung der Steuerung der Produktions- und Logistikprozesse kann mit dem entwickelten Konzept erzielt werden. Wie bereits durch das Anwendungsbeispiel deutlich wurde, können die Auslastung der Arbeitsstationen und Logistikmitarbeiter durch Experimente leicht aufeinander abgestimmt werden. Dabei betrachtet das Konzept alle Zeitaspekte, da es neben der Rückverfolgung der Objekte aus der Vergangenheit, sowohl die Echtzeitverfolgung als auch eine Prognose über die Zukunft ermöglicht.

Dabei bietet das Konzept ein stimmiges Gesamtsystem, bei dem die einzelnen Bausteine nach klaren Regeln für den individuellen Anwendungsfall angepasst werden können. Durch die vorgefertigten Bausteine lässt sich schnell ein aktuelles Modell erzeugen, dessen Umsetzbarkeit bereits bei der Anwendung anhand des Beispielmmodells gezeigt wurde. Die Schwachstellen des Modells, wie die langwierige Datenaufbereitung und die daraus resultierende geringe Detailtiefe, fallen im realen Einsatz des Modells weg, da in der Gesamtumsetzung des Traceability- und Simulationsmodells Echtzeitdaten übermittelt werden. Durch eine aussagestarke Datenbasis des Traceabilitysystems, die über lange Zeit geführt wird und die sinnvolle Auswertungen ermöglicht, wird die Datengrundlage für das Simulationsmodell präziser und somit die Prognose immer exakter.

Diese Prognose kann dann auch genutzt werden, um in nahezu Echtzeit Visualisierungen in der Fabrik zu generieren. Auf Monitoren in der Produktion könnten die aktuellen Prognosen und die in der nahen Zukunft voraussichtlich anfallende Arbeit angezeigt werden. Dies ermöglicht ein besseres Verständnis der Mitarbeiter für das System und die zu erreichenden Ziele.

So kann mit Hilfe des Simulationsmodells und der Daten, die aus dem Traceabilitysystem gewonnen werden, sowie einer Reihe von Experimenten ein besserer Arbeitspunkt gefunden werden. Dieser verbessert die Verknüpfung der Produktions- und Logistikprozesse. Weiterhin werden durch die aufgenommenen Daten eventuell vorhandene Qualitätsprobleme schneller behoben, da die Ursachen direkt zurückverfolgt werden können. Dies reduziert nicht nur Kosten, sondern verkürzt auch die Reaktionszeit. Zeitvorteile werden durch den besseren Einsatz von unterschiedlichen Schichtsystemen, Mitarbeitern und deren besserer Auslastung generiert. Dadurch können Kosten reduziert werden. Einsparungsmöglichkeiten bieten sich auch durch das bessere Verständnis von der benötigten Anzahl an Lagerplätzen und deren erforderlichen Kapazitäten.

Das vorgestellte Konzept bietet demnach eine Reihe von Vorteilen und Anwendungsmöglichkeiten, die für einen meist geringen Aufwand zu erzielen sind. Grundlagen für die einfache Modellierung ist ein funktionierendes Traceabilitysystem mit der passenden Schnittstelle. Die eigentliche Erstellung des Simulationsmodells ist, sofern die richtigen Daten vorhanden sind, schnell umzusetzen. Da Traceabilitysysteme immer häufiger benötigt und gefordert werden, ist der zusätzlich generierte Aufwand für die Umsetzung des vorgestellten Konzepts minimal. Die beschriebenen Daten und Parameter können, wenn sie nicht bereits in einer ähnlichen Form durch das System aufgenommen werden, leicht ergänzt werden. Somit ist der Aufwand zur Einführung eines solchen Konzepts in den meisten Fällen sehr gering, der Nutzen hingegen beträchtlich.

## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Vorgehen erläutert, mit dem die beiden Themengebiete Simulation und Traceability so miteinander verknüpft werden, dass sich ein stimmiges Gesamtkonzept entwickelt, welches eine Reihe von Vorteilen für die Steuerung der Produktions- und Logistikprozesse ermöglicht. Das Traceabilitysystem generiert dabei die Daten, die anschließend von der Simulation für eine Prognose genutzt werden.

Um dieses Konzept zu entwickeln ist zunächst eine Aufarbeitung der theoretischen Grundlagen erfolgt. Diese ermöglicht ein systematisches Vorgehen, die Ausnutzung aller Potentiale sowie die Verwendung von aktuellen Techniken bei der Entwicklung des Konzepts.

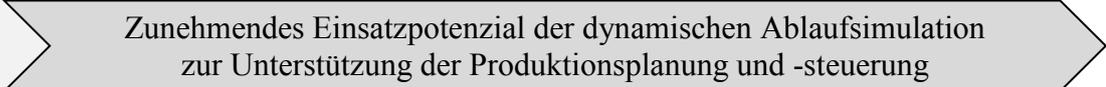
Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen ist ein einfaches Konzept für die Traceability von Objekten im Produktionsumfeld entwickelt worden. Es besteht im Wesentlichen aus sechs Bausteinen, für die jeweils die zu erhebenden Daten definiert sind. Zusätzlich sind in ihm die Randbedingungen für die Umsetzung des Traceabilitysystems, wie die Identifizierungstechnik oder die rückverfolgbaren Objekte bestimmt worden.

Basierend auf dem entstandenen Traceabilitysystem ist ein flexibles Simulationsmodell entwickelt worden. Es ist formal beschrieben und kann daher mit einem beliebigen Simulationswerkzeug realisiert werden. Für die Realisierung in dieser Arbeit ist die Simulationsumgebung Plant Simulation verwendet worden. Hierzu sind die notwendigen Bausteine und Methoden angepasst und so ein einfach zu erweiterndes Grundmodell erstellt worden. Dieses ist anhand eines realen Anwendungsbeispiels auf seine Eignung überprüft worden. Das anschließende Fazit bestätigt die Erzeugung von Vorteilen und die einfache Umsetzbarkeit.

Um das Konzept in ein reales Produktionssystem zu integrieren muss im nächsten Schritte eine detaillierte Betrachtung der Schnittstelle zwischen Simulationsmodell und Traceabilitysystem erfolgen. Die Grundlagen hierzu sind in dieser Arbeit bereits durch die Definition der übertragenen Daten geschaffen worden. Eine einfache Implementierung des Systems kann im Anschluss erfolgen und ermöglicht die verbesserte Steuerung der Produktions- und Logistikprozesse.

## 8 Anhang

**Tabelle 8-1** Merkmale der Ablauforganisation und Einsatzpotenzial der Ablaufsimulation nach Gierth und Schmidt (2006, S. 656)

<i>Merkmale</i>		<i>Ausprägungen</i>		
<b>Erzeugnisspektrum</b>	Erzeugnisse nach Kundenspezifikation	typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten	Standarderzeugnisse mit Varianten	Standarderzeugnisse ohne Varianten
<b>Erzeugnisstruktur</b>	mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur	mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur	geringteilige Erzeugnisse	
<b>Beschaffungsart</b>	weitgehender Fremdbezug	Fremdbezug in größerem Umfang	Fremdbezug unbedeutend	
<b>Fertigungsart</b>	Einmalfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung
<b>Ablaufart in der Teilefertigung</b>	Werkstattfertigung	Inselfertigung	Reihenfertigung	Fließfertigung
<b>Ablaufart in der Montage</b>	Baustellenmontage	Gruppenmontage	Reihenmontage	Fließmontage
				

**Tabelle 8-2** V&V Techniken nach Rabe et al.(2008) angelehnt an Eley (2012, S. 16)

V&V Technik	Beschreibung	Grad an Subjektivität	
		sehr hoch	weniger hoch
Animation	Zeitliche Abläufe in dem Modell werden zwei- oder dreidimensional graphisch dargestellt. Dabei kann nur beobachtet werden, ob die Abläufe im Modell in dem tatsächlich betrachteten Modell und Zeitabschnitt plausibel sind oder ob es Unterschiede zum realen System gibt.		
Begutachtung	Die Begutachtung durch das Management von Auftraggeber und –nehmer soll klären, ob die Simulationsstudie in Übereinstimmung mit den vereinbarten Zielen und Randbedingungen verläuft.		
Schreibtischtest	Sorgfältige Überprüfung der eigenen Arbeit in Bezug auf Vollständigkeit, Korrektheit, Konsistenz und Eindeutigkeit durch die Erstellung einer Dokumentation.		
Strukturiertes Durchgehen	Die Projektbeteiligten gehen jede Anweisung des Programms gemeinsam durch, bis alle von der Richtigkeit der Anweisungen überzeugt sind.		
Test von	Wenn das Modell hierarchisch in Teilmodelle		

Teilmodellen	strukturiert ist und die Dekomposition des Modells mit der realen Systemstruktur vergleichbar ist, kann geprüft werden ob die korrespondierenden Komponenten von realem System und Modell ausreichend gut übereinstimmen.		
Validierung im Dialog	Das Modell wird gemeinsam mit Fachexperten diskutiert, die Kenntnisse über das reale System besitzen.		
Monitoring	Die Werte von Zustandsgrößen und Variablen (z.B. Auslastung, Durchlaufzeit, Pufferbelegung) werden während des Simulationslaufes graphisch angezeigt und überprüft.		
Trace-Analyse	Es wird das Verhalten einzelner Objekte im ausführbaren Modell verfolgt und dabei das logische Verhalten und die Plausibilität überprüft.		
Turing-Test	Experten, die das reale System kennen, werden eine Reihe von Ausgabewerten aus der Simulation und Beobachtungen des realen Systems vorgelegt.		
Sensitivitätsanalyse	Eingabewerte des Modells werden verändert und die Auswirkungen auf Ausgabewerte bestimmt. Die Richtung der Auswirkung muss mit Beobachtungen in der Realität übereinstimmen.		
Vergleich mit anderen Modellen	Die Ergebnisse des Modells für bestimmte Eingabewerte werden mit den Ergebnissen eines anderen, i.d.R. einfacheren Modells bei gleichen Eingabewerten verglichen.		
Festwerttest	Ersetzen aller stochastischen Größen durch feste Werte, z.B. Ersetzen der Bearbeitungszeiten in einer Montagelinie durch den Mittelwert. Somit kann der Durchsatz der Linie leicht berechnet werden.		
Grenzwerttest	Eingabewerte werden so gesetzt, dass das Verhalten des Modells besser vorhersagbar wird, z.B. werden alle Losgrößen in einem Produktionssystem auf den kleinsten vorgesehenen Wert gesetzt.		
Ursache-Wirkungs-Graph	Die verschiedenen Ursachen und Wirkungen werden in einem Graphen dargestellt, der die logischen Beziehungen verdeutlicht.		
Validierung von Vorhersagen	Das Modell wird zunächst genutzt, um eine Vorhersage zu treffen. Anschließend wird die Richtigkeit dieser Vorhersage am realen System überprüft.		
Vergleich mit aufgezeichneten Daten	Ein- und Ausgabewerte eines real existierenden Systems, die in der Vergangenheit aufgezeichnet wurden, werden zum Test verwendet.		
Dimensions-test	Aufdecken von konzeptionellen Fehlern oder Fehlern bei der Entwicklung von Formeln durch die Nachrechnung der Dimension der Formel.		
Ereignis-	Vergleich des Auftretens von Ereignissen im Si-		

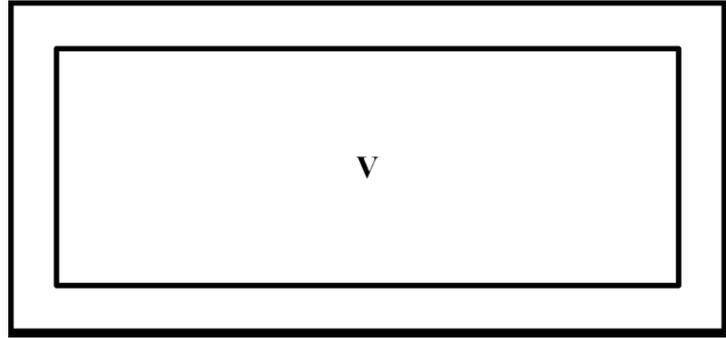
validitätstest	simulationsmodell mit der Realität, z.B. Anzahl an Aufträgen je Schicht.
Statistische Techniken	Dienen der Bewertung, mit welcher Sicherheit die Ausgabegrößen eines ausführbaren Modells das Verhalten des realen Systems beschreiben und der Überprüfung der Gültigkeit von im Modell verwendeten Verteilungen für Eingabegrößen
Test der internen Validität	Mit unterschiedlichen Startwerten der Zufallszahlengeneratoren werden bei gleichbleibenden Eingabewerten Simulationsläufe durchgeführt.

**Tabelle 8-3** Verwendete Datentypen und Wertebereiche in Plant Simulation

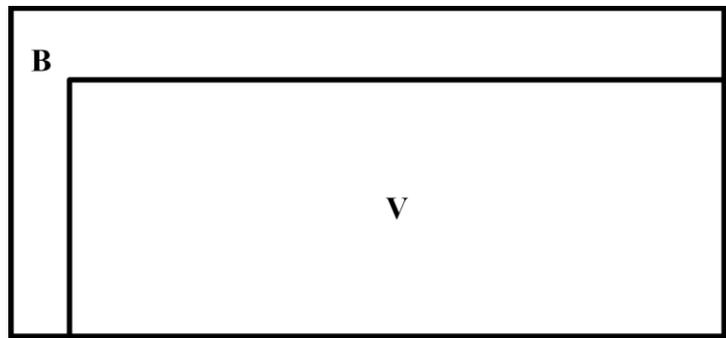
Datentyp	Wertebereich
<i>string</i>	Buchstaben(Klein und Groß) und Ziffern
<i>integer</i>	ganzzahlige Werte zwischen -2 147 483 648 und 2 147 483 647
<i>real</i>	Gleitkommazahlen zwischen - $8.9 \cdot 10^{307}$ und $8.9 \cdot 10^{307}$
<i>table</i>	besteht aus Spalten und Zeilen auf die über einen Index [Zeile, Spalte] zugegriffen wird
<i>time</i>	Gleitkommazahlen zwischen - $8.9 \cdot 10^{307}$ und $8.9 \cdot 10^{307}$ dargestellt im Format: <hh>:<mm>:<ss.ss>
<i>object</i>	verweist auf ein Objekt im Modell oder ist <i>void</i>
<i>speed</i>	Gleitkommazahlen zwischen - $8.9 \cdot 10^{307}$ und $8.9 \cdot 10^{307}$ mit Einheit m/s
<i>boolean</i>	„true“ oder „false“

**Tabelle 8-4** Sinnbilder für Struktogramme nach DIN 66261

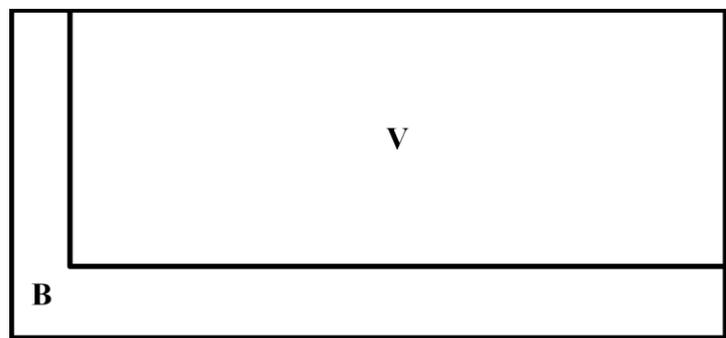
Inhalt	Darstellung
Verarbeitung	

**Block****Folge****Wiederholung**

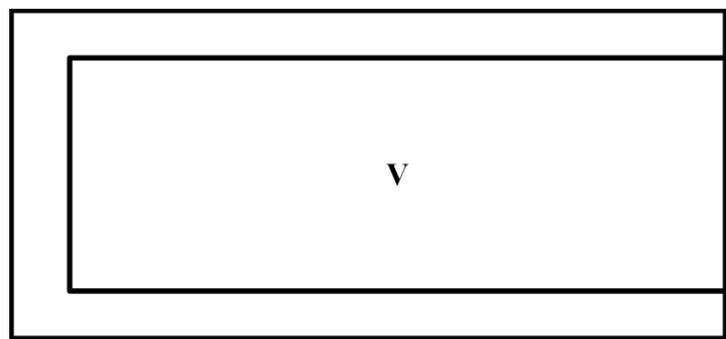
- vorausgehende Bedingungsprüfung

**Wiederholung**

- nachfolgende Bedingungsprüfung

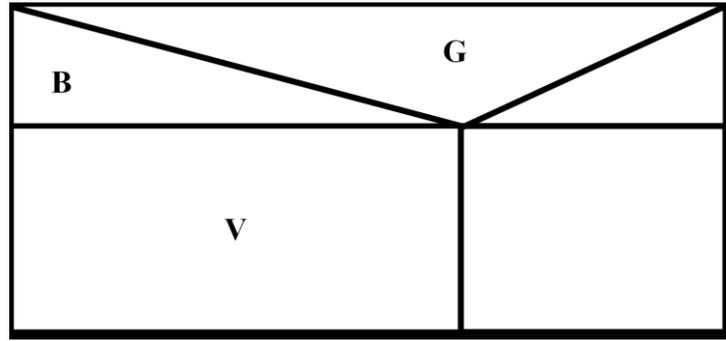
**Wiederholung**

- ohne Bedingung

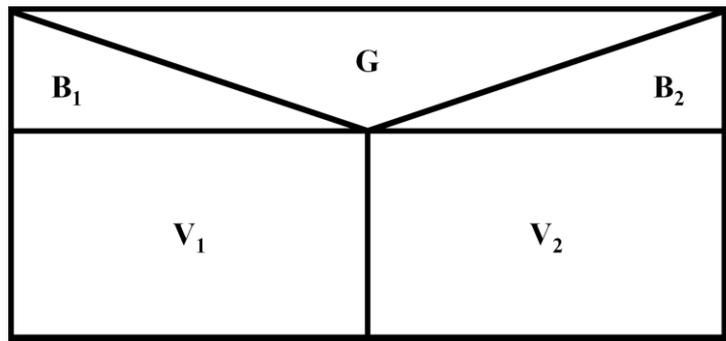


**Alternative**

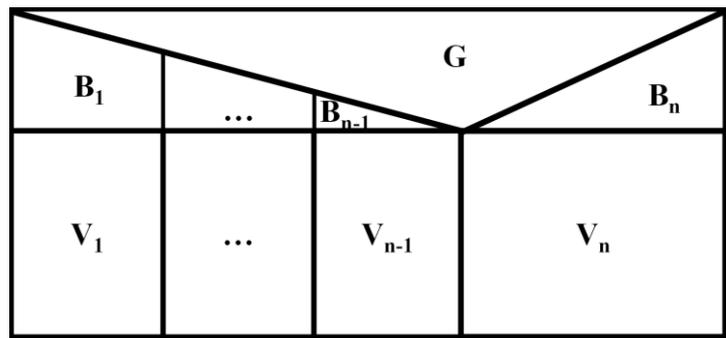
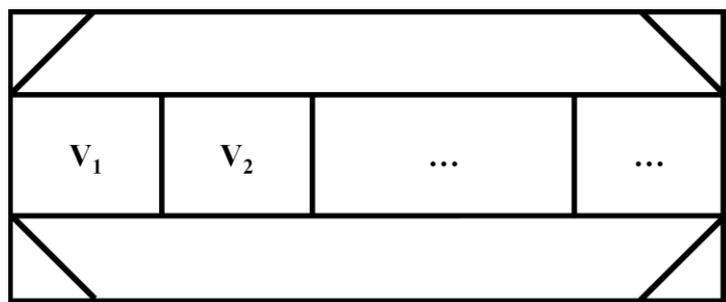
- bedingte

**Alternative**

- einfache

**Alternative**

- mehrfache

**Parallelverarbeitung****Abbruchanweisung**

**Tabelle 8-5** Verwendete Auftragsreihenfolge

Auftragsnummer	Anzahl	Endproduktart
1	93	Typ A Variante 1
2	324	Typ B Variante 4
3	108	Typ B Variante 7
4	196	Typ A Variante 4
5	196	Typ A Variante 2
6	108	Typ B Variante 3
7	108	Typ B Variante 4
8	108	Typ B Variante 4
9	108	Typ B Variante 8
10	108	Typ B Variante 5
11	108	Typ B Variante 8
12	540	Typ B Variante 9
13	108	Typ B Variante 8
14	240	Typ B Variante 9
15	51	Typ B Variante 2
16	216	Typ B Variante 11
17	70	Typ A Variante 3
18	216	Typ B Variante 6
19	11	Typ B Variante 1
20	108	Typ B Variante 7
21	196	Typ A Variante 6
22	196	Typ A Variante 5
23	2	Typ B Variante 16
24	108	Typ B Variante 13
25	216	Typ B Variante 3
26	120	Typ B Variante 2
27	54	Typ B Variante 17
28	108	Typ B Variante 19
29	27	Typ B Variante 15
30	34	Typ B Variante 14
31	60	Typ B Variante 12
32	108	Typ B Variante 18
33	392	Typ A Variante 6
34	196	Typ A Variante 5
35	196	Typ A Variante 3
36	108	Typ B Variante 5
37	660	Typ B Variante 9

**Tabelle 8-6** Namen der Lagerplätze und deren Lage im Modell

Lagerplatznummer	Lagerplatz am:	von Station:
1	Eingangslagerplatz	Montage 1.1
2	Eingangslagerplatz	Bearbeitung 1.2
3	Eingangslagerplatz	Montage 1.2
4	Ausgangslagerplatz	Montage 1.2
5	Eingangslagerplatz	Montage 2.1
6	Ausgangslagerplatz	Montage 2.1
7	Eingangslagerplatz	Montage 2.2
8	Ausgangslagerplatz	Montage 2.2
9	Eingangslagerplatz	Bearbeitung 3.1
10	Eingangslagerplatz	Bearbeitung 3.2
11	Ausgangslagerplatz	Bearbeitung 3.1
12	Ausgangslagerplatz	Bearbeitung 3.2
13	Eingangslagerplatz	Bearbeitung 3.3
14	Ausgangslagerplatz	Bearbeitung 3.3
15	Eingangslagerplatz	Bearbeitung 4.1
16	Eingangslagerplatz	Bearbeitung 1.1
17	Ausgangslagerplatz	Bearbeitung 1.1
18	Ausgangslagerplatz	Bearbeitung 4.2
19	Ausgangslagerplatz	Bearbeitung 4.3
20	Ausgangslagerplatz	Wareneingang
21	Supermarktplatz	Komponente 1 Variante 1
22	Supermarktplatz	Komponente 1 Variante 2
23	Supermarktplatz	Komponente 1 Variante 3
24	Supermarktplatz	Komponente 1 Variante 4
25	Supermarktplatz	Komponente 2 Variante 1
26	Supermarktplatz	Komponente 2 Variante 2
27	Supermarktplatz	Komponente 2 Variante 3
28	Supermarktplatz	Komponente 2 Variante 4
29	Supermarktplatz	Komponente 4 Variante 1
30	Ausgangslagerplatz	Kommissionierung
31	Ausgangslagerplatz	Endmontage
32	Eingangslagerplatz	Warenausgang
33	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 1
34	Supermarktplatz	Komponente 1 Variante 5
35	Ausgangslagerplatz	Bearbeitung 4.1
36	Eingangslagerplatz	Endmontage
37	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 2
38	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 3
39	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 4
40	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 5
41	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 6
42	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 7

---

43	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 8
44	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 9
45	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 10
46	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 11
47	Supermarktplatz	Komponente 3 Variante 12

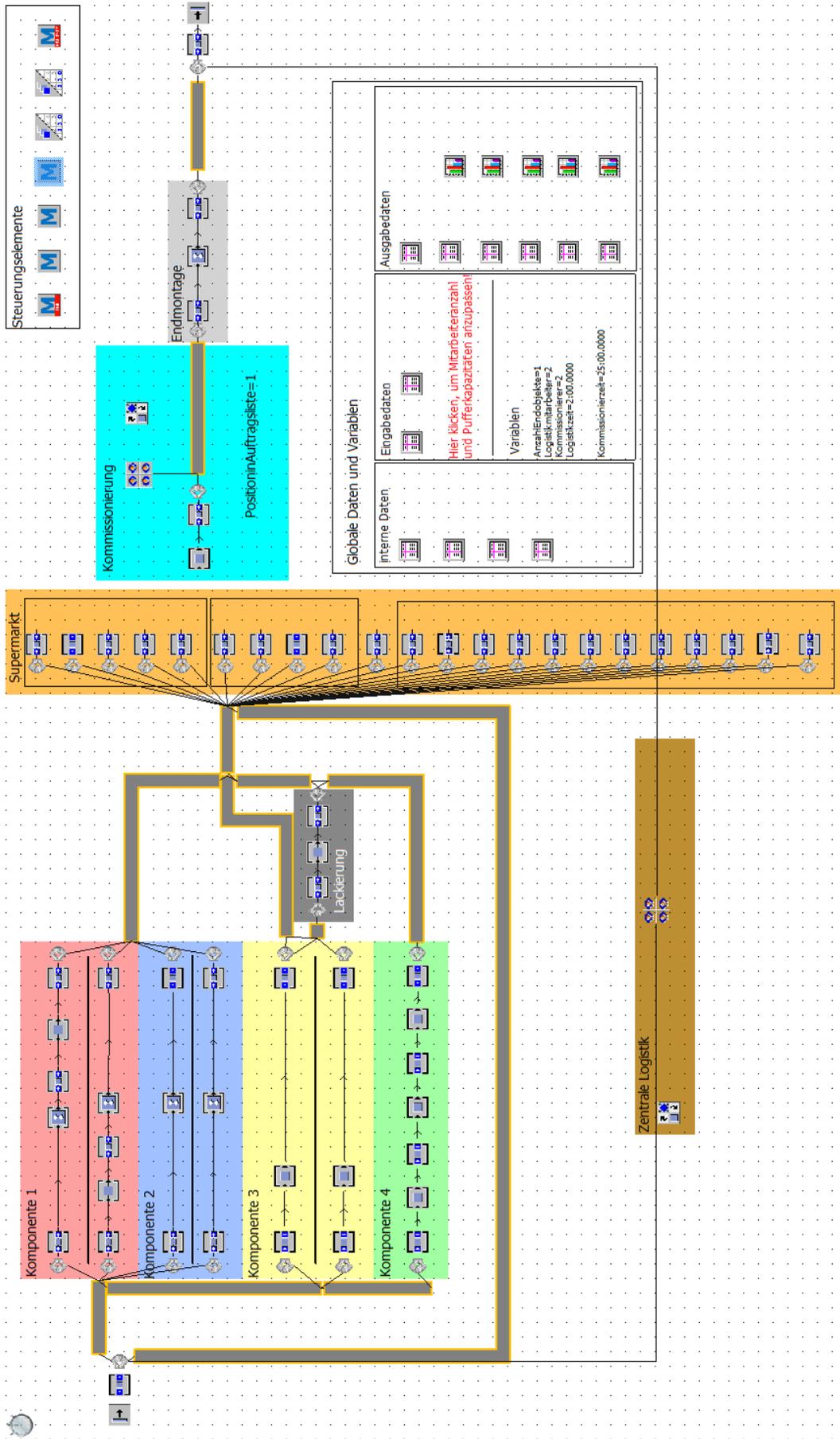


Abbildung 8-1 Gesamtansicht des Simulationsmodell

## 9 Literaturverzeichnis

DIN 66261, November 1985: Informationsverarbeitung - Sinnbilder für Struktogramme nach Nassi-Shneiderman.

DIN 6763, Dezember 1985: Nummerung-Grundbegriffe.

VDI-Richtlinie 3633 Blatt 3, Dezember 1997: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Experimentplanung und -auswertung.

VDI-Richtlinie 4401, September 2007: Materialfluss-Segmentierung.

VDI-Richtlinie 4499 Blatt1, Februar 2008: Digitale Fabrik - Grundlagen Blatt 1.

VDI-Richtlinie 2689 Entwurf, Mai 2010: Leitfaden für Materialflussuntersuchungen.

VDI 5200 Blatt 1, Februar 2011: Fabrikplanung.

VDI-Richtlinie 3633, Dezember 2013: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe.

VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1, Dezember 2014: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen.

VDI 5600 Blatt 1 (Entwurf), Januar 2015: Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems- MES).

VDI 5600 Blatt 5, März 2015: Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems- MES) - Neue Optimierungsansätze mit MES.

Abramovici, Michael; Bellalouna, Fahmi; Flohr, Matthias (2007): Durchgängige Rückverfolgbarkeit entlang der Supply-Chain. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (6), S. 367–370.

Abramovici, Michael; Bellalouna, Fahmi; Flohr, Matthias (2008): Traceability-Prozesse für die Automobilindustrie. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (3), S. 122–125.

Abramovici, Michael; Bellalouna, Fahmi; Flohr, Matthias (2009): Eine Lösung zur durchgängigen Produkt-Rückverfolgbarkeit entlang der Supply-Chain. Berliner Kreis-Mitteilungen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (01-02), S. 9–10.

Bangsow, Steffen (2011): Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk. Anwendung und Programmierung in über 150 Beispiel-Modellen. München: Hanser.

Bauernhansl, Thomas (2014): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wert-schaffendes Produktionsparadigma. In: Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 5–35.

- Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael; Vogel-Heuser, Birgit (Hg.) (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Becker, Jörg; Probandt, Wolfgang; Vering, Oliver (2012): Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Beine, Hilmar (2010): Technologietage 2010 in Wertheim - Ersä goes green. Baugruppenfertigung. In: *productronic* (12), S. 28–32.
- Bilek, Emine; Busch, Felix; Hartung, Jochen; Scheele, Carsten; Thomas, Carsten; Deuse, Jochen; Kuhlenkötter, Bernd (2012): Intelligente Erstellung und Nutzung von Maschinendokumentation. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (09), S. 652–656.
- Bolstorff, Peter A.; Poluha, Rolf G.; Rosenbaum, Robert G. (2007): Spitzenleistungen im Supply Chain Management. Ein Praxishandbuch zur Optimierung mit SCOR. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Böse, Felix; Uckelmann, Dieter (2006): Von der Chargenverfolgung zur Produktverfolgung. Veränderungen in der logistischen Rückverfolgung auf Basis innovativer Identifikationstechnologien. In: Corinna Engelhardt-Nowitzki und Elisabeth Lackner (Hg.): *Chargenverfolgung. Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungsgebiete*. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag (Leobener Logistik Cases), S. 133–148.
- Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid (2011): *Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Einbock, Marcus; Kummer, Sebastian (2006): Logistikelematik als Ansatzpunkt effizienter Chargenverfolgung. In: Corinna Engelhardt-Nowitzki und Elisabeth Lackner (Hg.): *Chargenverfolgung. Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungsgebiete*. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag (Leobener Logistik Cases), S. 193–208.
- Eley, Michael (2012): *Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).
- Erhard, Peter (2006): Herausforderung Traceability: Notwendiges Übel oder strategischer Wettbewerbsvorteil? In: *IT&PRODUCTION* (11).
- Fischer, Christian (2014): Planung und Steuerung von Montageanlagen. Grundlagen für die Optimierung in der Montage. In: Klaus Feldmann, Volker Schöppner und Günter Spur (Hg.): *Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren*. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, S. 602–603.

Fischer, Stefan (2006): Traceability Management: Wie Unternehmen die Risiken von Produktrückrufen begrenzen können. In: Corinna Engelhardt-Nowitzki und Elisabeth Lackner (Hg.): Chargenverfolgung. Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungsgebiete. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag (Leobener Logistik Cases), S. 175–192.

Franke, Werner; Dangelmaier, Wilhelm (Hg.) (2006): RFID-Leitfaden für die Logistik. Anwendungsgebiete, Einsatzmöglichkeiten, Integration, Praxisbeispiele. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr.Th.Gabler/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.

Gierth, Andreas; Schmidt, Carsten (2006): Zeiddynamische Simulation in der Produktion. In: Günther Schuh (Hg.): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3., völlig neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (VDI), S. 646–681.

Gleissner, Harald; Femerling, Christian (2008): Logistik. Grundlagen - Übungen - Fallbeispiele. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler (Lehrbuch).

Günthner, Willibald; Klenk, Eva; Tenerowicz-Wirth, Peter (2014): Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 297–323.

Günthner, Willibald A.; Wölflle, Michael (2011): Papierlose Produktion und Logistik. Garching: TUM, fml (Forschungsbericht / Fml, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik, Technische Universität München).

Haasis, Hans-Dietrich (2008): Produktions- und Logistikmanagement. Planung und Gestaltung von Wertschöpfungsprozessen. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.

Hirsch-Kreinsen, Hartmut (2014): Wandel von Produktionsarbeit - "Industrie 4.0". Soziologisches Arbeitspapier Nr. 38/2014. Technische Universität Dortmund. Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät.

Hofbauer, Günter; Sangl, Anita (2011): Professionelles Projektmanagement. Der prozessorientierte Ansatz, Rahmenbedingungen und Strategien. 2., überarb. und erweitert Aufl. Erlangen: PUBLICIS KommunikationsAgentur.

Hrdliczka, Veronika (1997): Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik. 2. Aufl. ASIM-Fachgruppe 4.5.6. Simulation in Produktion und Logistik (ASIM-Mitteilung, 58).

ifm Datalink (2013): Traceability in der Elektronikfertigung. In: mpa - messen prüfen automatisieren (6), S. 22–24.

- Jammernegg, Werner; Poiger, Martin (2013): Produktion. In: Sebastian Kummer, Oskar Grün und Werner Jammernegg (Hg.): Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. 3. Auflage. München [u.a.]: Pearson Studium, S. 203–296.
- Kern, Christian (2007): Anwendung von RFID-Systemen. 2., verb. Aufl. Berlin, New York: Springer (VDI).
- Kirsch, Andreas (2015): Systemeinführung in der Werkhalle. Operieren am offenen Herzen. In: IT&PRODUCTION (4).
- Kletti, Jürgen (Hg.) (2006): MES Manufacturing Execution System. Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung. Berlin, New York: Springer (VDI).
- Kletti, Jürgen (2013): Neue Anforderungen an die produktionsnahe IT. Mobiles Fertigungsmanagement. In: IT&PRODUCTION (4).
- Kohl, Johannes (2014): Planung und Steuerung von Montageanlagen. Datenbereitstellung. In: Klaus Feldmann, Volker Schöppner und Günter Spur (Hg.): Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, S. 610–612.
- Kottig, Ulf (2015): Schadensbegrenzung beim Produktrückruf. Infrastruktur für Tracking & Tracing. In: IT&PRODUCTION (3).
- Krainz, Thomas (2013): Prozessdaten für die Rückverfolgung nutzen. In: IT&PRODUCTION (4).
- Kreppenhof, Dietmar; Langer, Tino (2006): Komponentenbasierte Software-Technologie in der Produktionstechnik. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (4), S. 213–217.
- Kuhn, Axel; Wenzel, Sigrid (2008): Simulation logistischer Systeme. In: Dieter Arnold, Axel Kuhn, Kai Furmans, Heinz Isermann und Horst Tempelmeier (Hg.): Handbuch Logistik. 3., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch), S. 73–94.
- Kummer, Sebastian; Groschopf, Wolfram (2013): Grundlagen der betrieblichen Leistungserstellung. In: Sebastian Kummer, Oskar Grün und Werner Jammernegg (Hg.): Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. 3. Auflage. München [u.a.]: Pearson Studium, S. 21–110.
- Law, Averill M.; McComas, Michael G. (1991): Secrets of successful simulation studies. In: IEEE Computer Society (Hg.): WCS Winter Simulation Conference Proceedings, 1991. IEEE Computer Society Staff. Piscataway: IEEE, S. 21–27.
- Liedl, Georg (2014): Materialfluss zur Montage. In: Klaus Feldmann, Volker Schöppner und Günter Spur (Hg.): Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, S. 420–432.

- März, Lothar; Weigert, Gerald (2011): Simulationsgestützte Optimierung. In: Lothar März, Wilfried Krug, Oliver Rose und Gerald Weigert (Hg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin: Springer (VDI-Buch), S. 3–12.
- Neugebauer, Reimund; Langer, Tino; Wenzel, Ken (2008): Konzepte zur flexiblen Datenerfassung und -verwaltung bei Maschinen und Anlagen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (1-2), S. 41–47.
- Neumann, Klaus; Morlock, Martin (1993): Operations Research. München, Wien: Karl Hanser Verlag.
- Podgurski, Raphael (2013): Günstig produzieren um jeden Preis. MES ermöglicht nicht nur die lückenlose Rückverfolgbarkeit, sondern steigert auch die Fertigungseffizienz. In: *productronic* (5-6), S. 56–57.
- Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).
- Resl, Barbara; Windischbauer (2006): Warenflusssteuerung mit RFID. In: Corinna Engelhardt-Nowitzki und Elisabeth Lackner (Hg.): Chargenverfolgung. Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungsgebiete. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag (Leobener Logistik Cases), S. 59–72.
- Rose, Oliver; März, Lothar (2011): Simulation. In: Lothar März, Wilfried Krug, Oliver Rose und Gerald Weigert (Hg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin: Springer (VDI-Buch), S. 13–19.
- Schack, Rainer Jürgen (2007): Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik.
- Schlick, Jochen; Stephan, Peter; Loskyll, Matthias; Lappe, Dennis (2014): Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 57–84.
- Schmidt, B. (1988): Simulation von Produktionssystemen. In: Klaus Feldmann und B. Schmidt (Hg.): Simulation in der Fertigungstechnik, Bd. 10. Berlin: Springer, S. 1–45.
- Schönle, Hubert (2011): Qualitäts- und Fertigungsoptimierung mit Hilfe von Traceability und Analyse der Anlagenauslastung. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen 13 (3), S. 618.

- Schuh, Günther; Potente, Till; Thomas, Christina; Hauptvogel, Annika (2014): Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme. In: Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 277–295.
- Schuh, Günther; Schmidt, Carsten (2006): Prozesse. In: Günther Schuh (Hg.): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3., völlig neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (VDI), S. 108–194.
- Siemens PLM Software (2014): Tecnomatix Plant Simulation. Simulate, visualize, analyze and optimize production systems and logistics processes. Hg. v. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. Online verfügbar unter [http://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/products/tecnomatix/plant\\_design/plant\\_simulation.shtml#lightview%26uri=tcm:73-4957%26title=Plant-Simulation-Fact-Sheet-7541%26docType=.pdf](http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/plant_design/plant_simulation.shtml#lightview%26uri=tcm:73-4957%26title=Plant-Simulation-Fact-Sheet-7541%26docType=.pdf), zuletzt geprüft am 02.10.2015.
- ten Hompel, Michael; Heidenblut, Volker (2011): Taschenlexikon Logistik. Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Vastag, Alex (2008): Beschreibung und Abgrenzung der Distribution. In: Dieter Arnold, Axel Kuhn, Kai Furmans, Heinz Isermann und Horst Tempelmeier (Hg.): Handbuch Logistik. 3., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch), S. 405–411.
- Weckenmann, Albert; Dietlmaier, Adrian; Akkasoglu, Gökhan (2014): Qualitätssicherung und Traceability in der Montage. In: Klaus Feldmann, Volker Schöppner und Günther Spur (Hg.): Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, S. 834–856.
- Wegner-Hambloch, Sylvia (2004a): Rückverfolgbarkeit. In: Sylvia Wegner-Hambloch (Hg.): Rückverfolgbarkeit in der Praxis. Artikel 18 und 19 der VO (EG) Nr. 178/2002 schnell und einfach umgesetzt. 1. Aufl. Hamburg: Behr's Verlag, S. 9–12.
- Wegner-Hambloch, Sylvia (2004b): Rückverfolgbarkeit in Gesetzestexten und Leitfäden. In: Sylvia Wegner-Hambloch (Hg.): Rückverfolgbarkeit in der Praxis. Artikel 18 und 19 der VO (EG) Nr. 178/2002 schnell und einfach umgesetzt. 1. Aufl. Hamburg: Behr's Verlag, S. 13–18.
- Wegner-Hambloch, Sylvia; Springob, Katrin (2004a): Kernelemente von Tracking-&-Tracing-Systemen. In: Sylvia Wegner-Hambloch (Hg.): Rückverfolgbarkeit in der Praxis. Artikel 18 und 19 der VO (EG) Nr. 178/2002 schnell und einfach umgesetzt. 1. Aufl. Hamburg: Behr's Verlag, S. 61–68.

---

Wegner-Hambloch, Sylvia; Springob, Katrin (2004b): Was beinhalten Rückverfolgbarkeit, Traceability und Tracking & Tracing? In: Sylvia Wegner-Hambloch (Hg.): Rückverfolgbarkeit in der Praxis. Artikel 18 und 19 der VO (EG) Nr. 178/2002 schnell und einfach umgesetzt. 1. Aufl. Hamburg: Behr's Verlag, S. 59–60.

Wegner-Hambloch, Sylvia; van Betteray, Klemens (2004): EDV-unterstützte Umsetzung. In: Sylvia Wegner-Hambloch (Hg.): Rückverfolgbarkeit in der Praxis. Artikel 18 und 19 der VO (EG) Nr. 178/2002 schnell und einfach umgesetzt. 1. Aufl. Hamburg: Behr's Verlag, S. 41–58.

Wendel, Marc; Seewig, Jörg (2013): Verfahren zur Unikatsidentifizierung anhand inhärenter Bauteilmerkmale. Qualitätsschutz von Investitionsgütern. In: wt Werkstattstechnik online 103 (7/8), S. 600-604.

Wenzel, Sigrid (2008a): Modellbildung und Simulation in der Logistik. In: A. Lehmann und T. Krieger (Hg.): Modellbildung und Simulation, Operations Research. Methoden zur Gestaltung der Zukunft der Bundeswehr und zur Unterstützung von Einsätzen.: München.

Wenzel, Sigrid (2008b): Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin: Springer (VDI).

Westkämper, Engelbert (2006): Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).