

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DORTMUND

Fachgebiet IT in Produktion und Logistik
Prof. Dr.-Ing. M. Rabe

Bachelorarbeit zum Thema

Konzept für ein Simulationsmodell zur Leistungsanalyse von automatischen Kleinteilelagern im Kontext der Automobilindustrie

Henrik Braun

Dortmund, den 21. Februar 2018

Matrikelnummer: 169010
Studiengang: Logistik
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. M. Rabe
J. Hunker, M.Sc.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Nomenklatur	VII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Logistik in der Automobilproduktion	3
2.1 Historische Entwicklung der Automobilproduktion	3
2.2 Stellenwert der Logistik	4
2.2.1 Netzwerk und Lieferanten - die Versorgung der Werke	4
2.2.2 Innerbetriebliche Logistik - die Versorgung der Montagelinie .	6
2.3 Belieferungskonzepte	8
2.3.1 Verbrauchssynchrone Belieferung	8
2.3.2 Lageranlieferung	10
3 Automatische Kleinteilelager	13
3.1 Aufgaben von Lagersystemen	13
3.2 Technische Bestandteile eines AKLs	14
3.3 Leistungsbestimmung bei automatischen Kleinteilelagern	19
3.4 Betriebsstrategien für den Betrieb automatischer Lager	21
3.4.1 Lagerplatzvergabestrategien	22
3.4.2 Auslagerstrategien	23
3.4.3 Bewertung der Strategien zur Anwendung in der Automobilin-	
dustrie	25
4 Ereignisdiskrete Simulation	29
4.1 Begriffsdefinitionen	29
4.2 Stochastische Grundlagen	31
4.3 Grundlagen ereignisdiskreter Simulation	32
4.4 Anwendungsgebiete ereignisdiskreter Simulation	35
4.5 Ablauf einer Simulationsstudie	37
5 Entwicklung eines Konzeptmodells	43
5.1 Zielbeschreibung	43
5.2 Aufgabendefinition	43

5.3	Systemanalyse	45
5.3.1	Vereinfachende Prämissen	45
5.3.2	Systembeschreibung	48
5.3.3	Spezifizierung der physischen Modellkomponenten	49
5.3.4	Spezifizierung der steuerungsrelevanten Modellkomponenten	51
5.3.5	Übersicht über die zu modellierenden Komponenten und deren Parameter	54
6	Validierung des Konzeptmodells an einem Fallbeispiel	57
6.1	Aufgaben des Logistiksystems	57
6.2	Systembeschreibung	57
6.3	Prämissen und Systemgrenzen	59
6.4	Modellkomponenten	59
7	Zusammenfassung und Ausblick	63
	Literaturverzeichnis	64

Abbildungsverzeichnis

2.1	Struktureller Wandel von der Hierarchie zum Netzwerk, eigene Darstellung nach (Urban 2007, S. 3)	5
2.2	Vergleich Stapler- und Schleppzug-Bereitstellung, eigene Darstellung nach (Klug 2010, S. 187)	7
2.3	Versorgungskonzepte, eigene Darstellung nach (Heiserich, Helbig und Ullmann 2011, S. 179)	9
2.4	Schematischer Vergleich von Direkt-, Sammel- und Milkrun-Verkehren, eigene Darstellung nach (Vahrenkamp und Kotzab 2012, S. 222-223)	11
3.1	Stellung eines Lagers im Materialfluss eines Industrieunternehmens, in Anlehnung an (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 53) . . .	15
3.2	Schematische Darstellung der Bewegungsachsen im Regal, nach (Verein Deutscher Ingenieure 1994, S. 6)	16
3.3	Schematischer Ausschnitt einer Regalanlage inkl. KLT, eigene Darstellung	17
3.4	Schematische Darstellung eines RBGs (Thomas 2008, S. 664)	18
3.5	Schematische Darstellung einer Lagervorzone	19
3.6	Schematische Darstellung von Arbeitsspielen, eigene Darstellung nach (Federation Europeenne de la Manutention Sektion IX 2003)	20
3.7	Schematische Darstellung einer ABC-Clusterung, eigene Darstellung nach (Brandes 1997, S. 90)	23
3.8	Schematischer Ablauf der Vorlaufzeitadaption, eigene Darstellung nach (Brandes 1997, S. 158)	25
4.1	Schematische Darstellung eines Systems, eigene Darstellung nach (Gutenschwager u. a. 2017, S. 12)	30
4.2	Beziehung von Zustands- und Zeitmenge sowie die daraus resultierenden Zustandsübergänge (Gutenschwager u. a. 2017, S. 16)	33
4.3	Schematischer Ablauf einer ereignisdiskreten Simulation (Mattern und Mehl 1989, S. 201)	35
4.4	Methoden zur Untersuchung eines Systems (Daniluk und Chizu 2010, S. 150)	35
4.5	Vorgehensschema zur Durchführung einer Simulationsstudie (Rabe, Spieckermann und Wenzel 2008, S. 32)	38
5.1	Systemgrenzen des Konzeptmodells (eigene Darstellung)	48
6.1	Materialfluss im Fallbeispiel (eigene Darstellung)	58

Tabellenverzeichnis

4.1	Simulation in Produktion und Logistik (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 4-9; Daniluk und Chizu 2010, S. 150)	36
5.1	Übersicht über die zu modellierenden Komponenten und deren Parameter	55
6.1	Übersicht über die zu modellierenden physischen Komponenten und deren Parameter	60
6.2	Übersicht über die zu modellierenden steuerungsrelevanten Komponenten und deren Parameter	61

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
AKL	automatisches Kleinteilelager
B2B	Business to Business
B2C	Business to Customer
FIFO	First-in-first-out
JIS	Just-In-Sequence
JIT	Just-In-Time
KLT	Kleinladungsträger
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LAM	Lastaufnahmemittel
LHM	Ladehilfsmittel
LIFO	Last-in-first-out
LPM	Lean Production Management
LVS	Lagerverwaltungssystem
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time To Repair
MzW	Mann zur Ware
OEM	Original Equipment Manufacturer
RBG	Regalbediengerät
SMI	Supplier Managed Inventory
V & V	Verifikation und Validierung
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WzM	Ware zum Mann

1 Einleitung

Um u. a. den Lagerbestand, die Durchlaufzeit sowie die Kapitalbindungskosten im Lager zu reduzieren, haben Automobilhersteller die Just-in-Time-Beschaffung (JIT-Beschaffung) eingeführt. Durch die JIT-Beschaffung werden geringere Bestände vorgehalten, wodurch bspw. die Kapitalbindungskosten und die Durchlaufzeiten der Materialien gesenkt werden können. Durch die geringere Lagerreichweite muss eine Belieferung stetig sowie synchron zur Produktion erfolgen. Um die Materialien zwischen der Anlieferung und dem Abruf zu lagern, hat sich für kleinteilige Ware u. a. die Lagerung in automatischen Kleinteilelagern etabliert (Klug 2010, S. 299-302).

Um termintreue Fahrzeugauslieferungen zu gewährleisten ist es essentiell, dass die Bereitstellung der Materialien an den entsprechenden Verbauorten in der richtigen Menge, zur richtigen Zeit und in der richtigen Qualität erfolgt (Heiserich, Helbig und Ullmann 2011, S. 8). Hierbei liegt ein besonderes Augenmerk auf der Leistung der Lager. Werden Materialien aufgrund zu geringer Leistung des Lagersystems zu spät ein- bzw. ausgelagert, können die Fahrzeuge nicht korrekt montiert werden. Aufgrund des in der Produktion angewendeten Perlenkettenprinzips mit zusätzlicher Erweiterung um eine pull-orientierte Steuerungskomponente (Klug 2010, S. 388) und den damit einhergehenden geringen Materialbeständen an der Montagelinie, können neben der späteren Nachmontage der Fahrzeuge auch Bandstillstände die Folge sein. Aus diesem Grund muss die Gesamtleistung des Lagersystems leistungsgerecht dimensioniert sein.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Konzept für ein Simulationsmodell zu erstellen. Dieses Konzeptmodell kann als Basis für weiterführende Modellierungen von Computersimulationen dienen. Mit Hilfe einer Computersimulation kann eine leistungsgerechte Dimensionierung erfolgen.

Ein Konzeptmodell ist ein Phasenergebnis bei der Durchführung einer Simulationsstudie. Daher werden in Kapitel 4 die grundlegenden Begrifflichkeiten zu dem Thema Simulation im Allgemeinen und zur ereignisdiskreten Simulation im Besonderen vermittelt. Dieses Kapitel dient ebenso als Grundlage für die Umsetzung der Systemanalyse anhand eines gewählten Fallbeispiels (siehe Kapitel 6). Da es sich bei dem betrachteten Fallbeispiel um ein automatisches Kleinteilelager handelt, wird in Kapitel 3 der Aufbau sowie die Funktion eines automatischen Kleinteilelagers besprochen. Durch dieses Wissen wird es möglich, die Erstellung des Konzeptmodells nachzuvollziehen und kritisch zu hinterfragen. Zudem wird der Begriff Leistung in Verbindung mit automatischen Lagern erläutert. Hierfür werden analytische Verfahren betrachtet und es werden die Grenzen der analytischen Leistungsbestimmung genannt sowie die Möglichkeiten der Simulationstechnik herausgearbeitet.

Da sich das betrachtete Lagersystem im Kontext der Automobilindustrie bewegt,

1 Einleitung

werden die in diesem Zusammenhang verwendeten Begriffe erläutert. Weiterhin werden in einem Überblick wichtige Logistikkonzepte beschrieben und es wird der Stellenwert der Logistik im Zusammenhang mit der Automobilproduktion beleuchtet.

Neben den technischen Komponenten eines automatischen Kleinteilelagers werden zusätzlich Betriebsstrategien für effiziente Bewirtschaftungen im Kontext eines automatischen Kleinteilelagers besprochen. Durch das gewonnene Wissen aus dem vorherigen Kapitel werden zusätzlich diese beschriebenen Strategien auf ihre Eignung in der Automobilproduktion bewertet. Hieraus folgt eine konkrete Empfehlung, welche Strategien sich im besonderen Maße für die Anwendung in der Automobilproduktion eignen.

2 Grundlagen der Logistik in der Automobilproduktion

Dieses Kapitel widmet sich den Grundlagen der Logistik in der Automobilproduktion. Zu Beginn wird die historische Entwicklung der Automobilproduktion dargelegt. Anhand dieser Entwicklung lässt sich der Stellenwert der Logistik ableiten. Anschließend werden die gängigsten Belieferungskonzepte in der Automobilproduktion erläutert.

2.1 Historische Entwicklung der Automobilproduktion

In der Anfangszeit der Automobilproduktion waren die Produktionsstätten mit Manufakturen gleichzusetzen. Automobile wurden in kleinen Stückzahlen mit langen Produktionszeiten zu entsprechend hohen Kosten gefertigt. Zu dieser Zeit galt ein Automobil mehr als Luxus- denn als Gebrauchsgut. Um ein Automobil dem Massenmarkt zugänglich zu machen, führte Henry Ford die variantenarme Fließbandproduktion ein und es konnten Automobile in hohen Stückzahlen zu erschwinglichen Preisen produziert werden (Hüttenrauch und Baum 2007, S. 6).

Um eine gleichbleibende Qualität gewährleisten zu können, produzierte Ford damals einen Großteil der Komponenten eigenständig, da Zulieferer nicht in der Lage waren, die benötigten Stückzahlen in der geforderten Qualität zu produzieren (Hüttenrauch und Baum 2007, S. 10). Weiterhin wurden die Komponenten in großen Stückzahlen produziert und anschließend gelagert, um die Fließbandproduktion nicht zu stoppen (Hüttenrauch und Baum 2007, S. 16). Die Massenfertigung war damals nur durch eine geringe Variantenvielfalt möglich, selbst bei der Farbe wurde dem Kunden keine eigene Entscheidung eingeräumt (Hüttenrauch und Baum 2007, S. 10). Untrennbar verbunden ist damit das Zitat Henry Fords: „Any customer can have a car painted any colour that he wants so long as it is black.“ Hieran wird deutlich, dass der Kunde keine individualisierten Fahrzeuge bestellen konnte, sondern lediglich aus bereits gefertigten, hoch standardisierte Fahrzeugen, auswählen konnte. Es fand also eine Produktion auf Lager statt (built to stock) (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 170).

In Japan wurde nach der Niederlage des zweiten Weltkriegs ein grundlegend verschiedener Ansatz gewählt. Ressourcen zur Produktion waren ein rares Gut und auch die Grundstückspreise waren deutlich höher als zu Zeiten der Produktion des Ford T-Modells, um 1913 (Hüttenrauch und Baum 2007, S. 17). Der Automobilproduzent Toyota reagierte hierauf, indem kleinere Produktionslose gewählt wurden. So wurden die Lager nicht mehr maximal befüllt, sondern Konzepte entwickelt, um gemäß dem

tatsächlichen Verbrauch Materialien bereit zu stellen (Hüttenrauch und Baum 2007, S. 16).

Weiterhin wurde über den gesamten Produktionsprozess hinweg die Effizienz gesteigert in dem bspw. Verschwendungen reduziert und die Qualitäten gesteigert wurden. In diesem Zusammenhang sind Konzepte wie «Kontinuierlicher Verbesserungsprozess» (KVP), Kaizen oder Lean Production Management (LPM) zu nennen. Da die Erklärung dieser Konzepte den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, sei hierfür auf weiterführende Literatur wie bspw. (Brunner 2017) verwiesen.

Die Bedeutung der Zulieferer stieg zudem beständig. Den Zulieferern war es möglich, komplexe Technologien kostengünstig zu produzieren und anzubieten. Die Fertigungstiefe Toyotas sank daher stetig und immer mehr Komponenten wurden zugekauft. Weiterhin trat der Wunsch nach individualisierten Fahrzeugen in den Vordergrund. Da nun nicht mehr die Fahrzeuge vorproduziert wurden, ging man dazu über, die Fahrzeuge erst nach Abschluss des Kaufvertrages zu produzieren (built to order) (Hüttenrauch und Baum 2007, S. 17).

Die Folge dieser gewünschten Individualität und dem resultierenden Wechsel von einem Verkäufer- zu einem Käufermarkt ist die Massenindividualisierung (Mass Customization). Unter der Massenindividualisierung versteht man die Möglichkeit, „dass eine derart große Vielfalt von preiswerten und im Design variierenden Gütern anzubieten ist, dass nahezu jeder Konsument genau das findet, was er sich gerade wünscht“ (Vahrenkamp und Kotzab 2012, S. 5). Daraus resultiert eine stetige Steigerung der angebotenen Varianten sowie eine zunehmende Auswahl an Sonderausstattungen und deren Kombinationen. Diese zunehmende Komplexität in den Portfolios der Automobilhersteller führt gleichzeitig zu einer Komplexitätssteigerung in den logistischen Prozessen, da die Produktion in der richtigen Reihenfolge mit den benötigten Materialien versorgt werden muss.

2.2 Stellenwert der Logistik

In diesem Abschnitt wird der Stellenwert der Logistik in der Automobilproduktion erarbeitet. Hierzu wird die externe Belieferung der Werke sowie der interne Materialfluss innerhalb der Werke beleuchtet.

2.2.1 Netzwerk und Lieferanten - die Versorgung der Werke

Durch den weitgehenden Verzicht auf Zulieferer zu Zeiten Henry Fords und der überwiegend eigenständigen Fertigung, musste lediglich die Produktion mit ausreichend Material versorgt werden. Aufgrund der Fließbandfertigung ohne verschiedene Varianten, mussten daher stets die gleichen Teile aus den Lagern an das Fließband transponiert werden. Da die Vorprodukte in ausreichender Menge vorhanden waren und die Lager in der Nähe der Produktionsstätten angesiedelt waren, wurde der Logistik zu dieser Zeit kein großer Stellenwert beigemessen. Hier stand die ununterbrochene Fahrzeugproduktion im Vordergrund .

Waren die Aufgaben der Logistik zu Beginn noch von den klassischen militärischen Einflüssen (Nachschub, Verpflegung, Transport) geprägt (Günter 2006, S. 17), vergrößerte sich das Aufgabenspektrum mit der Einbeziehung der Lieferanten und dem weltweitem Einkauf von Komponenten (Klug 2010, S. 41). Heutzutage wird nur wenig von den OEM (Original Equipment Manufacturer) in Eigenfertigung hergestellt. Es werden nahezu alle Komponenten, die der Kunde nicht direkt mit der Automobilmarke in Verbindung bringt, von Zulieferern hergestellt und von dem Automobilbauer lediglich montiert (Urban 2007, S. 1).

Die Gründe für das Outsourcing können vielfältig sein. Durch Outsourcing ist es möglich, Kosteneinsparungen zu erzielen, da die Mitarbeiter in vielen Fällen zu anderen Tarifgruppen gehören. Um weitere Einsparungen zu generieren, lagern die Zulieferer wiederum in großem Maße Produktionsschritte aus und es entstehen zum Teil Zuliefererketten, mit dem OEM an der Spitze dieser Pyramide (siehe Abbildung 2.1).

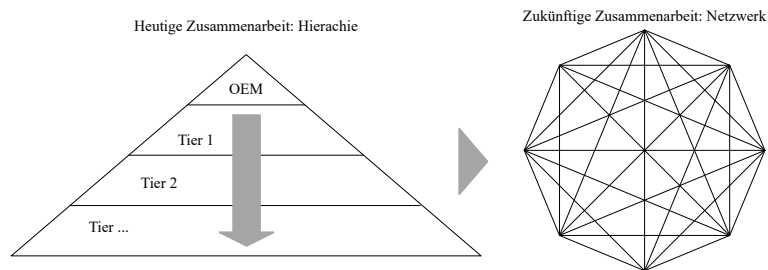


Abbildung 2.1: Struktureller Wandel von der Hierarchie zum Netzwerk, eigene Darstellung nach (Urban 2007, S. 3)

Ebenfalls in Abbildung 2.1 zu sehen, wandelt sich die hierarchische Zuliefererstruktur zu einem Zulieferernetzwerk, da immer mehr OEM auf mehrere Zulieferer für identische Bauteile setzen. Durch diesen strategischen Schritt ist es auch bei Lieferengpässen oder erhöhter Nachfragen möglich, die Produktion reibungslos fortzuführen (Urban 2007, S. 1-4).

Nur durch eine effiziente Logistik ist es möglich, dass diese Netzwerke und Lieferketten intakt zusammenarbeiten. Zu den Aufgaben der Logistik zählen daher u. a.:

- Transport
- Umschlag
- Lagerung
- Bestandsdisposition
- Montageversorgung
- Lieferantenmanagement

- Supply Chain Management
- Behältermanagement
- Bedarfsplanung
- Vormontagetätigkeiten
- diverse Produktveredelungen

(Klug 2010, S. 125)

2.2.2 Innerbetriebliche Logistik - die Versorgung der Montagelinie

Im vorherigen Abschnitt wurde die Versorgung der Werke beschrieben. Sobald die Materialien angeliefert wurden, müssen diese jedoch zu den Verbauorten an die Montagelinien transportiert werden.

In der Produktion, speziell in der Automobilproduktion, werden vermehrt Routenzüge anstelle von Gabelstaplern eingesetzt, da mittels Routenzug „auf effiziente Weise unterschiedlichste Ladungsträger in kleinen Losen und hoher Frequenz gebündelt an unterschiedliche Orte transportiert werden können“ (Dewitz u. a. 2012, S. 12). Ein Schlagwort in diesem Zusammenhang ist die «staplerlose Produktion» (Dewitz u. a. 2012, S. 8). Ein Routenzug ist ein Schleppverbund aus einer Zugmaschine sowie mehreren Anhängern. Durch einen Routenzug kann mehr Ladung transportiert werden, als mit einem Gabelstapler. Hieraus resultiert eine Reduzierung der innerbetrieblichen Fahrten (Klug 2010, S. 186) (siehe hierzu Abbildung 2.2). Die gestrichelten Linien entsprechen hierbei den notwendigen Fahrwegen, die ein Transportmittel zurücklegen muss. Wie in der Abbildung 2.2 zu erkennen, muss ein Gabelstapler den Transport von Leer- und Vollpaletten trennen und für dieses Handling zwei Fahrten aufbringen. Weiterhin wird an diesem Beispiel deutlich, dass durch einen Routenzug eine gleichmäßigere Belieferungsstruktur als mit einem Gabelstapler umgesetzt werden kann. Durch die Reduzierung der Fahrwege werden bspw. das Unfallrisiko sowie der Personaleinsatz gesenkt. Weiterhin ist der gleichzeitige Transport von Leer- und Vollbehältern im Milkrun-Prinzip (siehe Abbildung 2.4(b)) möglich.

Die Beladung der Routenzüge erfolgt aus Lagern oder Puffern (Dewitz u. a. 2012, S. 16). Da Routenzüge auf festen Routen zu bestimmten Zeiten die Montage versorgen, muss die Bereitstellung der Materialien in vorgegebenen Zeitfenstern erfolgen. Erfolgt die Bereitstellung zu spät, hat dies schwerwiegende Auswirkungen auf die nachgelagerte Produktion, da die eingeplanten Materialpuffer an der Montagelinie diese Schwankungen nur einen bestimmten Zeitraum ausgleichen können. Sind die Bestände an der Linie aufgebraucht, kann ein Produktionsstopp die Folge sein.

Auf den Pufferflächen werden Materialien nach der JIT-/JIS-Anlieferung (siehe hierzu Unterabschnitt 2.3.1) möglichst kurz gepuffert und anschließend auf die Routenzüge verladen. Handelt es sich um JIS-Anlieferungen, müssen die Anlieferungsreihenfolgen eingehalten werden, die der Montagereihenfolge entspricht.

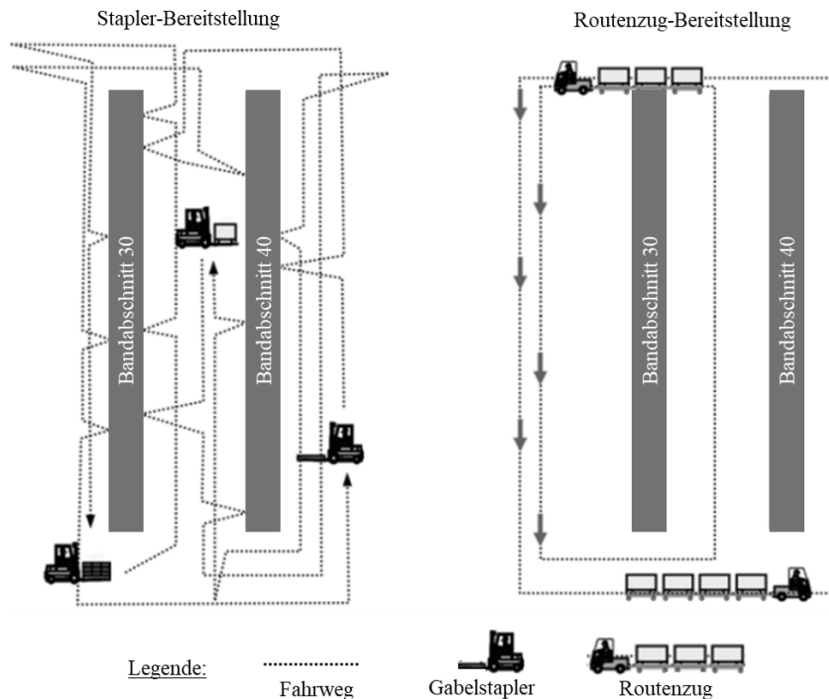


Abbildung 2.2: Vergleich Stapler- und Schleppzug-Bereitstellung, eigene Darstellung nach (Klug 2010, S. 187)

Die Beladung der Routenzüge kann auch in verbauortnahen Lagern, den Supermärkten, erfolgen.

„Unter einem Supermarkt versteht man ein fertigungsnahes Logistiksystem (Flächen, Regale, Auftragsdrucker, etc.) für den Umschlag von Montagematerial, um es portioniert, sortiert und sequenziert in kurzen Lieferzyklen produktionssynchron am Verbauort der Montage bereitzustellen.“ (Klug 2010, S. 197).

Hier kommissionieren Mitarbeiter die benötigten Materialien und laden diese auf die Anhänger der Routenzüge. Ähnlich wie die Anlieferungspuffer für JIT- bzw. JIS-Anlieferungen werden auch in den Supermärkten Materialien gepuffert. Hier handelt es sich jedoch um Materialien aus anderen Produktionsbereichen, die zur Sicherstellung der Versorgung des folgenden Produktionstaktes vorgehalten werden. Der Name Supermarkt ist eine Anspielung auf das zugrunde liegende Prinzip der Entnahme und Bestückung dieses Lagers. Der Mitarbeiter muss die benötigten Materialien lediglich entnehmen und auf die Wagen des Routenzuges laden. Die Befüllung der leeren Fächer erfolgt dabei durch andere Mitarbeiter. Dieses Prinzip ist mit dem eines Supermarktes, in dem der Kunde die Ware entnimmt und ein Mitarbeiter mit der Befüllung der Regale beauftragt ist, vergleichbar (Klug 2010, S. 197-198).

Neben den genannten Verfahren werden noch andere eingesetzt, die jedoch nicht

im Fokus dieser Arbeit stehen sollen.

Fazit

An diesem Kapitel lässt sich der große Stellenwert, den die Logistik innerhalb der Automobilproduktion inne hat, erkennen. Weiterhin wird die Wichtigkeit funktionierender Teilsysteme innerhalb der Logistik, zu denen auch die automatischen Kleinteilelager zählen, verdeutlicht. Der benötigte effiziente Materialfluss kann nur durch eine funktionierende Verbindung von Material- und Informationsfluss gelingen. Werden Daten zu spät übermittelt, können Materialien nicht rechtzeitig übergeben werden.

2.3 Belieferungskonzepte

Wurden in früheren Zeiten die Lager komplett gefüllt, um keine Produktionsausfälle aufgrund fehlender Materialien verzeichnen zu müssen, wandelte sich dieser Ansatz zu einer kostenoptimalen Lagerhaltung (Hüttenrauch und Baum 2007, S. 15-16). Um dies umsetzen zu können, müssen spezielle Belieferungskonzepte angewandt werden. Hierzu wird auf die lagerlose Direktanlieferung und auf die klassische Lageranlieferung eingegangen.

2.3.1 Verbrauchssynchrone Belieferung

Bei der verbrauchssynchronen Beschaffung werden die benötigten Materialien nach dem Pull-Prinzip ohne eine zusätzliche Lagerung direkt an den entsprechenden Verbauplätzen weiterverarbeitet. Bei dem Pull-Prinzip werden die benötigten Materialien von Verbrauchsorten an den Lieferanten gemeldet und anschließend geliefert. Die Produktion «zieht» (engl. pull) die Materialien also in die Produktion und es werden lediglich die benötigten Mengen geliefert. Bei dem gegenteiligen Prinzip, dem Push-Prinzip, werden die Materialien in die nächste Stufe der Produktion geschoben (engl. push), ohne den tatsächlichen Verbrauch dieser zu kennen.

Die verbrauchssynchrone Belieferung wird auch als ship-to-line-Zulieferung bezeichnet (vgl. Abbildung 2.3). Finden auf Seiten des Zulieferers noch Prozesse wie Kontrolle und Lagerung statt, entfallen diese Prozesse auf Seiten des Abnehmers (siehe Abbildung 2.3) (Heiserich, Helbig und Ullmann 2011, S. 178). Damit diese Art der Belieferung reibungslos funktioniert, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Sicherstellung einer gleichbleibend hohen Qualität der gelieferten Produkte und der Lieferungen insgesamt, da sich Mängel direkt auf die Produktion auswirken.
- Bildung von Kapazitätsreserven, um Bedarfsschwankungen und Störungen ausgleichen zu können.
- Sicherstellung minimaler Transportwege.

2.3 Belieferungskonzepte

- Stetiger Informationsaustausch zwischen Zulieferer und Abnehmer, zur Übermittlung von Bedarfsmengen, Reihenfolgen und Lieferzeitpunkten.
- Festlegen von vertraglichen Vereinbarungen hinsichtlich Strafzahlungen bei Nichterfüllung der geforderten Leistungen.
- Aufbau einer engen Beziehung zwischen Lieferant und Abnehmer, um gemeinsame Strategien zu entwickeln, um einer Verschiebung der Kapitalbindung vom Abnehmer zum Lieferanten entgegenzuwirken.

(Bichler u. a. 2011, S. 11-12).



Abbildung 2.3: Versorgungskonzepte, eigene Darstellung nach (Heiserich, Helbig und Ullmann 2011, S. 179)

Bei der Belieferung nach dem line-to-line-Konzept, werden die Produktionen von Zulieferer und Abnehmer derart synchronisiert, dass auf beiden Seiten die Lagerung entfällt. Die Materialien werden somit direkt nach der Produktion verladen und zum Abnehmer transportiert und dort direkt am benötigten Ort weiterverarbeitet. Dieses Konzept stellt somit eine Fortführung des ship-to-line-Konzeptes dar. Es muss allerdings immer im Einzelfall geprüft werden, ob sich die beiden Produktionen derart genau synchronisieren lassen und nicht Faktoren wie Maschinenauslastung andere Losgrößen bei den Zulieferern fordern als bei den Abnehmern (Heiserich, Helbig und Ullmann 2011, S. 178).

Bei diesen beiden genannten Konzepten handelt es sich um Idealvorstellungen. In der Praxis ist es oft nicht möglich, vollständig auf eine Lagerung zu verzichten. So wird mit der Belieferung nach dem JIT-Prinzip im Zuge eines kontinuierlichen Materialflusses versucht, diesen Idealen möglichst nahe zu kommen (Heiserich, Helbig und Ullmann 2011, S. 178). Bei der JIT-Belieferung finden pro Tag mehrere Belieferungen statt und

es werden lediglich sortenreine, in geringer Variantenzahl vorliegende, Materialien geliefert. Bei diesen Anlieferungen wird die Reihenfolge der Fahrzeuge in der Montage nicht berücksichtigt. Ist die Montagereihenfolge relevant, muss dies mittels der Just-in-Sequence-Belieferung (JIS) realisiert werden. Die JIS-Belieferung ist ebenfalls eine verbrauchssynchrone Belieferung und stellt eine Weiterführung der JIT-Belieferung dar. Typische JIS-Umfänge sind großvolumige Module. Dies können bspw. Sitze, Dachhimmel und Kabelbäume sein (Klug 2010, S. 299-305).

Wie bereits in den Voraussetzungen für eine verbrauchssynchrone Belieferung beschrieben, sollten die Transportwege für diese Materialarten möglichst gering sein. Distanzen von 30 - 100 km oder weniger sind ideal, um schwankende Transportzeiten zu minimieren und Transportkosten zu senken. Um diese Distanzen realisieren zu können, werden Lieferanten-Lager oder Lieferanten-Logistik-Zentren in der Nähe der Werke errichtet. Die Zulieferer versorgen diese Lager verbrauchsentkoppelt mit Material und es wird von dort verbrauchssynchron an die Montagelinie transportiert (siehe Abbildung 2.3) (Heiserich, Helbig und Ullmann 2011, S. 180).

Durch die verbrauchssynchrone Belieferung kann von einer erhöhten Umweltbelastung durch vermehrte LKW-Fahrten ausgegangen werden und die Straßen zu den Werken werden ebenfalls stärker durch die «rollenden Lager» beansprucht. Weiterhin tauscht das Unternehmen einen Großteil seiner Sicherheit gegen eine mögliche Rentabilitätsverbesserung und schichtet einen Teil seiner Bestandskosten in Risikokosten um. Um diese Kosten möglichst gering zu halten, müssen die Anlieferungen termingerecht durchgeführt und exakt geplant werden.

Diesen Kosten stehen aber auch kostensenkende Faktoren gegenüber. Durch die stetige Belieferung mit kleinen Losgrößen, werden die Bestandskosten entlang der gesamten Versorgungskette gesenkt und die Durchlaufzeiten werden durch absatzmarktorientierte Maßnahmen verringert, was in einer Erhöhung der Lieferbereitschaft mündet (Heiserich, Helbig und Ullmann 2011, S. 178-180; Bichler u. a. 2011, S. 12). Zusätzlich wird durch diese Art der Belieferung die benötigte Flexibilität in der Produktion geschaffen, um die Anforderungen von Mass Customization umzusetzen (Vahrenkamp und Kotzab 2012, S. 219).

Die verbrauchssynchrone Belieferung erfolgt immer dann, wenn die Bedarfe der Produktionsbetriebe hoch und genau vorauszuberechnen sind (Bichler u. a. 2011, S. 12).

2.3.2 Lageranlieferung

Lässt sich die verbrauchssynchrone Belieferung nicht umsetzen, da es sich z. B. um Materialien mit schwankendem Bedarf handelt, kann hier die Einführung von Lagerstufen sinnvoll sein (Vahrenkamp und Kotzab 2012, S. 220). Neben schwankenden Bedarfen sind folgende Gründe ebenfalls relevant:

- Geringwertigkeit der Teile
- Große räumliche Entfernung zwischen Lieferant und Abnehmer

- Stark schwankende Transportzeiten
- Hohe Rüstkosten und daher Fertigung großer Lose
- Schwere Prognostizierbarkeit des Bedarfes

(Klug 2010, S. 308).

Durch die Lagerung der Materialien kann trotz ungenauer Vorhersagen die Produktion sichergestellt werden, da die Produktion und die Zulieferung voneinander entkoppelt werden. Es wird jedoch auch Kapital gebunden, weshalb die Liquidität des Unternehmens sinkt. Weiterhin müssen Orte geschaffen werden, um eine Lagerung durchführen zu können. Es sollte daher genau abgewogen werden, ob und in welcher Menge Materialien in Lagern vorgehalten werden sollen (Klug 2010, S. 308).

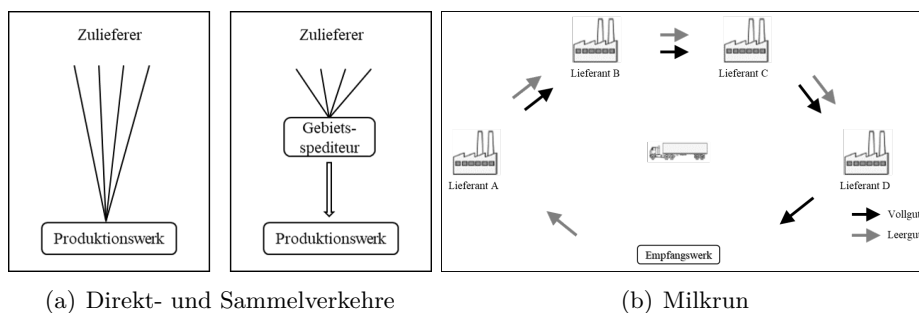


Abbildung 2.4: Schematischer Vergleich von Direkt-, Sammel- und Milkrun-Verkehren, eigene Darstellung nach (Vahrenkamp und Kotzab 2012, S. 222-223)

Bei der verbrauchssynchronen Belieferung werden die Materialien stets im Direktverkehr zu den Produzenten transportiert. Findet eine Lagerhaltung statt, kann hiervon abgesehen werden und es können Sammelverkehre, bspw. durch einen Gebietspediteur, durchgeführt werden. Hierdurch lassen sich Teilladungen bündeln und die Transportkosten können gesenkt werden (vgl. 2.4(a)). Bei einem sogenannten Milkrun handelt es sich um eine Sammelrundtour. Hier werden die Materialien von den unterschiedlichen Lieferanten von einem (Gebiets)Spediteur abgeholt und im Gegenzug wird Leergut zurückgebracht. So werden die Fahrten für den Transport von Voll- und Leergut kombiniert und die Behälter werden in den Behälterkreislauf zurückgeführt.

In Abbildung 2.3 sind neben den bereits besprochenen verbrauchssynchronen Konzepten auch die Konzepte mit integrierter Lagerhaltung dargestellt. So werden sowohl bei der «konventionellen Zulieferung», als auch bei der «ship-to-line-Zulieferung» Lager auf Seiten der Abnehmer eingesetzt. Eine Besonderheit stellt das Konzept mit der Verwendung von Lieferanten-Lagern bzw. Lieferanten-Logistik-Zentren dar. Hier findet zwar keine Lagerung auf Seiten des Abnehmers statt, jedoch werden die Materialien verbrauchsentkoppelt in diese Lager geliefert und von dort verbrauchssynchron an die Montagelinie geliefert (vgl. Abbildung 2.3).

2 Grundlagen der Logistik in der Automobilproduktion

Durch sogenannte Montageabrufe werden Auslager- und Anlieferungsaufträge generiert und die Montage wird mit Material versorgt.

Dem Zulieferer wird im Rahmen des Supplier Managed Inventory (SMI) die Verantwortung über für Bestandsdisposition übertragen. Durch Zugriff auf die Produktions- sowie Lagerdaten ist es dem Zulieferer möglich, die selbstständig Anlieferungen zu koordinieren, um festgelegte Mindestmengen einzuhalten und die Lieferfähigkeit sicherzustellen.

3 Automatische Kleinteilelager

In einem automatischen Kleinteilelager (AKL) werden Materialien gelagert, kommissioniert oder verteilt (Oser 2008, S. 660).

Dieses Kapitel vermittelt notwendiges Wissen sowohl zum Aufbau als auch zur grundsätzlichen Funktion eines AKLs. Dieses Wissen wird für die nachfolgenden Kapitel 6 sowie Kapitel 5 benötigt.

Weiterhin wird der Leistungsbegriff im Kontext eines AKLs beschrieben und es werden analytische Berechnungsmethoden zur Leistungsbestimmung eines AKLs erläutert. Ebenso werden Lagerbetriebsstrategien besprochen und im Kontext der Automobilindustrie eingeordnet.

3.1 Aufgaben von Lagersystemen

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) versteht unter Lagern „jedes geplante Liegen des Arbeitsgegenstandes im Materialfluß“ (Verein Deutscher Ingenieure 1970, S. 18). Das Lagern findet auf speziellen Flächen oder in dafür vorgesehenen Räumen, sogenannten Lagern, statt. Hierbei werden die zu lagernden Materialien mengen-/oder wertmäßig erfasst (Verein Deutscher Ingenieure 1970, S. 17).

Der Lagerprozess lässt sich dabei in folgende Teilprozesse gliedern:

- Einlagern
- Aufbewahren und Bereithalten
- Auslagern

Das Kommissionieren wird als Zusatzprozess verstanden, bei dem ganze Ladungsträger ausgelagert und gemäß vorliegender Aufträge zusammengestellt werden (Gudehus 2010, S. 565).

Neben der direkten Ein- bzw. Auslagerung von Behältern kann es vorkommen, dass bei Mehrplatzlagern benötigte Behälter von anderen verdeckt werden. Um diese hinteren Behälter zugänglich zu machen, müssen die davor stehenden zuerst in andere Fächer verbracht werden. In diesem Fall spricht man vom «Umlagern» (Gudehus 2010, S. 573).

Umlagerungen können dabei innerhalb derselben Gasse und ohne Einbezug der Vorzone durchgeführt werden. Aber auch ein Gassenwechsel der Behälter kann durchgeführt werden, indem die Behälter von der stetigen Behälterfördertechnik in der Vorzone transportiert werden (Verein Deutscher Ingenieure 1994, S. 5).

Dass das Lagern zu den Kernprozessen (Gudehus 2010, S. 565) innerhalb der innerbetrieblichen Logistik gehört, kann man Abbildung 3.1 entnehmen. Über diesen Prozess hinaus gibt es weitere Grundfunktionen, die in jedem Lagersystem, unabhängig von der speziellen Aufgabe, vorhanden sind. Zur besseren Einordnung werden diese Aufgaben hier kurz erläutert.

Im Rahmen der Warenannahme und der Identifikation werden die angelieferten Materialien auf Unversehrtheit kontrolliert und die Art und Menge mit der Lieferung beiliegenden Informationen abgeglichen. Gemäß den Vorgaben des Lagerverwaltungssystems (LVS) werden die Materialien nach diesen beiden Schritten entweder direkt in den Versandbereich des Lagersystems weitergeleitet, für zu bearbeitende Kommissionieraufträge bereitgestellt, oder eingelagert. Die Einlagerung erfolgt dabei manuell, teilautomatisch oder automatisch. Gemäß der obigen Definition findet beim Lagern die Überbrückung einer Zeitdauer statt (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 50). Werden nach dieser Zeit Materialien für den Versand oder die Kommissionierung benötigt, werden diese gemäß der Auftragsinformationen ausgelagert. Die Aufgabe der Kommissionierung ist die Zusammenstellung von Teilmengen aus der Gesamtmenge der im Lager vorrätigen Materialien. Die Bereitstellung der Materialien kann entweder nach dem Prinzip Mann-zur-Ware (MzW) oder aber Ware-zum-Mann (WzM) stattfinden. Da die Bereitstellung der Materialien in einem AKL mittels eines automatischen Regalbediengerätes (siehe Abschnitt 3.2) erfolgt, werden die Materialien nach dem Prinzip der Ware zum Mann (WzM) bereitgestellt (Bichler u. a. 2011, S. 173). Bei diesem Prinzip verbleibt der Kommissionierer statisch an einem Kommissionierplatz und die zu kommissionierenden Artikel werden zu diesem Platz gefördert.

Das Gegenteilige Prinzip ist Mann zur Ware (MzW). Hier verbleiben die Artikel bis zur Entnahme am Lagerplatz und der Kommissionierer bewegt sich durch das Lager zu den entsprechenden Fächern (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 190).

Wie der Abbildung 3.1 zu entnehmen, kann ein Kreislauf zwischen Einlagerung, Lagerung, Auslagerung und Kommissionierung entstehen. Es besteht also die Möglichkeit, bereits kommissionierte Aufträge erneut zu lagern und zu einem späteren Zeitpunkt zu versenden. Versandziele können interne oder externe Kunden sein. Interne Kunden können bspw. Verbauorte in der Produktion sein. Externe Kunden sind die klassischen Kunden im Business-To-Business (B2B) oder Business-To-Customer (B2C). Dies hängt von der Art und der Position des Systems in der Struktur der Unternehmung ab (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 53-54).

3.2 Technische Bestandteile eines AKLs

Ein AKL ist eine komplexe, in sich geschlossene, technische Anlage, die aus verschiedenen, miteinander interagierenden, Komponenten aufgebaut wird (Bichler u. a. 2011, S. 173).

Automatische Hochregallager lassen sich gemäß (Verein Deutscher Ingenieure 1994) in zwei Bereiche unterteilen. Zum einen in den Fördermittelbereich und zum

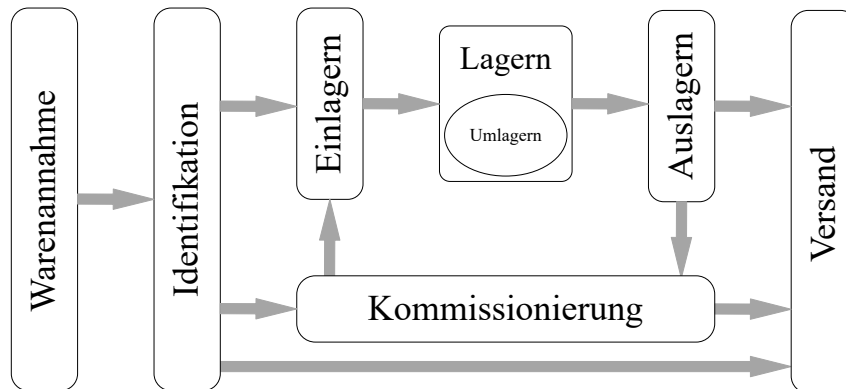


Abbildung 3.1: Stellung eines Lagers im Materialfluss eines Industrieunternehmens, in Anlehnung an (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 53)

anderen in Hochregallagerbereich. „Zum Fördermittelbereich gehören alle für den automatischen Ablauf nötigen Fördermittel, wie z. B. Rollenbahnen [...] usw.“ (Verein Deutscher Ingenieure 1994, S. 3). „Der Hochregallagerbereich umfaßt [sic!] den Wirkungsbereich der Regalförderzeuge“ (Verein Deutscher Ingenieure 1994, S. 3). Aufgrund der gleichen morphologischen Merkmale sind diese Einteilungen und deren Bestandteile in kleinerem Maßstab auch in AKL zu finden (Brandes 1997, S. 16), weshalb diese Definition auch hier gelten.

In einem AKL finden Bewegungen auf drei Achsen statt. Wie in Abbildung 3.2 zu erkennen spricht man von der x-,y- und z-Achse. Die x-Achse verläuft horizontal parallel zum Gang, die y-Achse verläuft vertikal senkrecht zum Gang und die z-Achse verläuft horizontal senkrecht zum Gang (Gudehus 2010, S. 572).

Nachfolgend werden die einzelnen Bestandteile eines AKLs genannt und deren Aufbau und Funktion beschrieben.

Regalanlage

Anders als bspw. bei der Bodenblocklagerung, bei der das Lagergut, meist Paletten oder andere Großladungsträger, direkt auf dem Boden gelagert wird (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 36), findet in einem AKL die Lagerung in Regalen statt (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 21). Mit Hilfe eines Regals ist es möglich, durch Ausnutzen der zur Verfügung stehenden Raumhöhe auf relativ kleiner Fläche viele Materialien zu lagern (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 252). Eine Regalgasse wird unterteilt in zwei Regalzeilen und einen Bediengang (siehe Abbildung 3.2). Bei einem AKL verfährt in dem Bediengang das Regalbediengerät (siehe Abschnitt 3.2). Die Breite des Bediengangs ist abhängig von der Größe des Lagergutes und dem Lastaufnahmemittel (siehe hierzu Abschnitt 3.2). Die Regale werden fest mit dem Boden verschraubt und können je nach Gebäuderestriktion verschiedene Längen respektive Höhen aufweisen. In der Praxis werden Höhen zwischen 7 m und 18 m

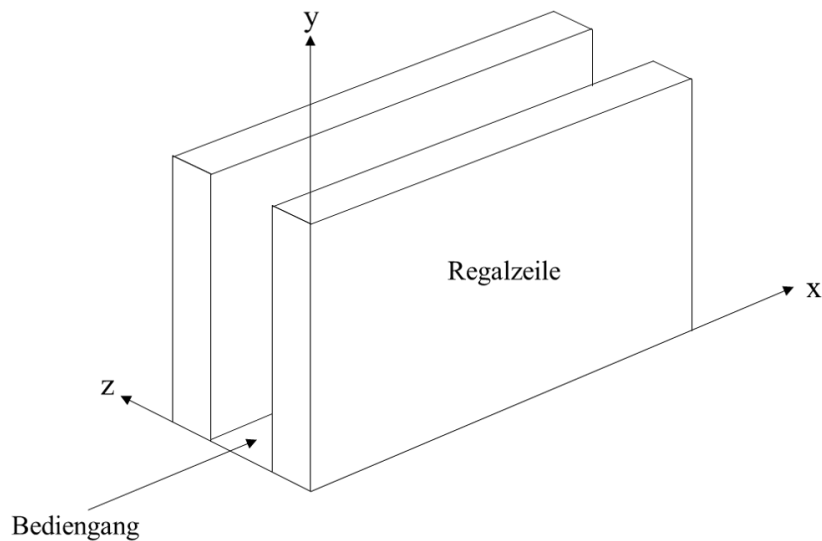


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Bewegungsachsen im Regal, nach (Verein Deutscher Ingenieure 1994, S. 6)

realisiert (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 68).

Bei der Lagerung in Regalen kann eine Einzel- oder Mehrplatzlagerung realisiert werden. Bei der Einzelplatzlagerung wird ein Behälter pro Fach pro Ebene gelagert. Bei der Mehrplatzlagerung hingegen werden pro Fach mehrere Behälter gelagert. Die Anzahl der Behälter kann je nach Abmessungen des Regalelements sowie den Abmessungen des Lagerguts variieren. In Abbildung 3.3 wird schematisch verdeutlicht, welche Kombinationen möglich sind. So können Behälter nebeneinander in x-Richtung, als auch hintereinander in y-Richtung gelagert werden (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 195).

Durch die eingelagerten Materialien wirken Lasten auf die Regalfächer. Die Fachlast beschreibt dabei die maximal wirkende Last, die durch die eingelagerten Materialien auf das Regalfach wirken darf (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 93). Sind pro Regalfeld mehrere Fächer übereinander angebracht, muss zusätzlich noch die Feldlast berücksichtigt werden. Die Feldlast ist die Summe der Fachlasten zwischen den senkrechten Regalstehern (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 97).

Ladehilfsmittel

Voraussetzung für den Betrieb eines AKLs ist die Verwendung von Ladehilfsmitteln (LHM). Dies können Kunststoffbehälter, auch Kleinladungsträger (KLT) genannt, Tablette oder auch Kartons in wenigen standardisierten Abmessungen und guter Qualität sein (Bichler u. a. 2011, S. 173).

Da diese Arbeit im Kontext der Automobilproduktion geschrieben wird, werden

3.2 Technische Bestandteile eines AKLs

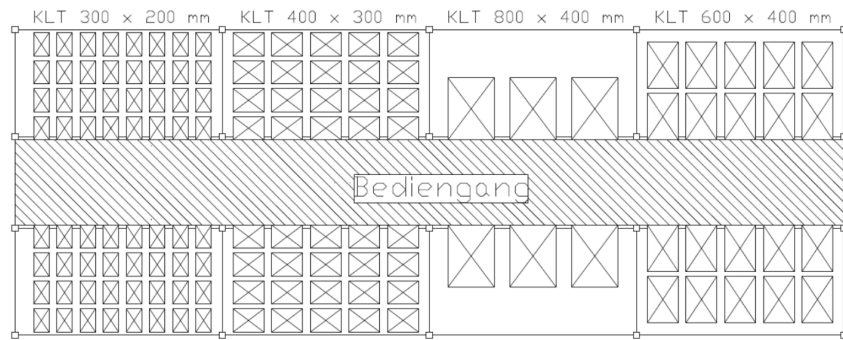


Abbildung 3.3: Schematischer Ausschnitt einer Regalanlage inkl. KLT, eigene Darstellung

nachfolgend lediglich die VDA-KLT (siehe Abbildung 3.4) betrachtet. VDA-KLT sind Ladungsträger, die gemäß einer Empfehlung des «Verband der Automobilindustrie (VDA)» „zur Optimierung der logistischen Kette zwischen Automobilherstellern, Zulieferindustrie und Dienstleistern“ (Verband der Automobilindustrie VDA 2015, S. 5) beitragen sollen. Die Abmessungen der Grundflächen sind sowohl auf das Grundmaß der Europalette (1.200 x 800 mm) als auch auf das Grundmaß der Industriepalette (1.200 x 1000 mm) abgestimmt.

VDA-KLT werden in den folgenden Abmessungen (L*B*H) verwendet:

- 600 x 400 x 280 mm
- 600 x 400 x 213 mm
- 600 x 400 x 147 mm
- 400 x 300 x 280 mm
- 400 x 300 x 213 mm
- 400 x 300 x 147 mm
- 300 x 200 x 147 mm

(Verband der Automobilindustrie VDA 2015, S. 8-10). Neben der geeigneten Größe des KLTs muss die zu erfüllende Logistikfunktion betrachtet werden. Typische Logistikfunktionen, die an einen KLT gestellt werden, sind bspw. stapelbar, antistatisch oder temperaturbeständig (Thomas 2008, S. 661).

Regalbediengeräte

Regalbediengeräte (RBG) sind unstetige Fördermittel (vgl. Abschnitt 3.2) zur automatischen oder manuellen Ein- bzw. Auslagerung von LHM in Regalgassen (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 186). Im Rahmen dieser Arbeit wird hingegen nur auf die automatischen Varianten eingegangen, da in einem AKL per Definition keine manuelle Bedienung der Regalfächer stattfindet.

Der Mast des RBGs verfährt mittels Lauf- und Führungsrollen horizontal auf einer

3 Automatische Kleinteilelager

Schiene, die auf dem Boden angebracht ist. Angetrieben wird das RBG durch einen Elektromotor.

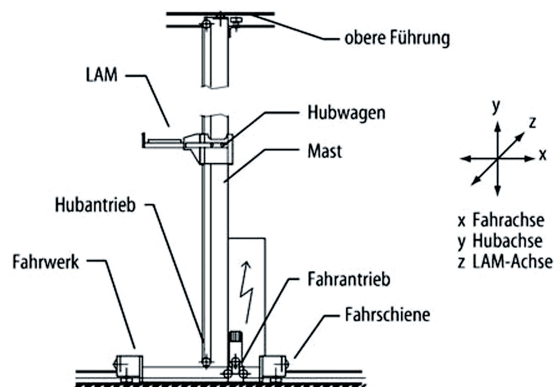


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung eines RBGs (Thomas 2008, S. 664)

Zusätzlich zu der Führungsschiene am Boden wird am oberen Ende des Regals bzw. unter dem Dach eine weitere Führungsschiene angebracht, die zusätzlich für Stabilität sorgt (Koether 2007, S. 85). An dem Mast ist ein Hubwagen montiert, der sich in vertikaler Richtung bewegt. Der Hubwagen wird mittels eines zweiten Elektromotors, dem Hubwerk, angetrieben. Durch den Mast und den Hubwagen ist es möglich, horizontale und vertikale Bewegungen im Regal (in der x- und y-Richtung) zu realisieren. Durch das gleichzeitige Verfahren in horizontaler sowie vertikaler Achse wird eine Diagonalfahrt realisiert. Diese Diagonalfahrt stellt eine optimierte Fortbewegung im Lager dar, da sich die Zeit im Vergleich zu einem getrennten Verfahren verringert (Abschnitt 3.3 (Koether 2007, S. 87)). Für das Handling der LHM ist das Lastaufnahmemittel (LAM) zuständig. Es tätigt die Aufnahme oder die Abgabe der LHM und wird an dem Hubwerk montiert. Die dritte Bewegungsdimension wird durch das LAM abgedeckt (z-Richtung). Je nach LHM oder Umschlagsleistungsanforderungen muss aus verschiedenen LAM gewählt werden.

Fördertechnik

Um die Materialien in einem Logistiksystem von einer Quelle zu einer Senke zu transportieren, werden Fördermittel eingesetzt (ten Hompel, Büchler und Franzke 2007, S. 2). Nach VDI 2411 (Verein Deutscher Ingenieure 1970, S. 7) versteht man unter fördern „das Fortbewegen von Arbeitsgegenständen oder Personen in einem System“. Diese Fortbewegung kann auf verschiedene Weise erfolgen. Fördermittel werden in stetige sowie in unstetige Fördermittel unterteilt. Die Begriffe stetig bzw. unstetig beziehen sich hierbei auf die Bewegung des Fördergutes. Bei stetiger Fördertechnik wird ein kontinuierlicher Fördergutstrom erzeugt. Unstetige Fördermittel hingegen arbeiten in Arbeitsspielen (siehe Abschnitt 3.3), also einem Wechsel zwischen

3.3 Leistungsbestimmung bei automatischen Kleinteilelagern

Last- und Leerspielen. Stetige Fördersysteme arbeiten über einen längeren Zeitraum und sind grundsätzlich ortsfeste Einrichtungen. Diese Fördermittel bewegen sich nicht, sondern lediglich das Fördergut. Dies führt zu einer geringeren Flexibilität, jedoch bewirkt die kontinuierliche Bewegung der Güter einen höheren Durchsatz als bei un stetigen Fördermitteln (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 123-129; Großeschallau 1984, S. 38).

Bei automatischen Lagern wird stetige Fördertechnik in der Vorzone des Lagers eingesetzt (Arnold und Furmans 2009, S. 190). Die Fördertechnik in der Vorzone besitzt mehrere Übergabepunkte. So dienen einige als Schnittstelle für den angrenzenden Wareneingang bzw. Warenausgang. Andere Übergabepunkte bilden „die physische Schnittstelle zwischen dem Arbeitsbereich der RBG und den Fördersystemen der Lagervorzone“ (Arnold und Furmans 2009, S. 211). In Logistiksystemen werden verschiedene Fördersysteme eingesetzt. Im Wareneingang werden bspw. Gabelstapler zur Entladung der LKW verwendet (siehe Kapitel 6). Um die Behälter in das AKL zu

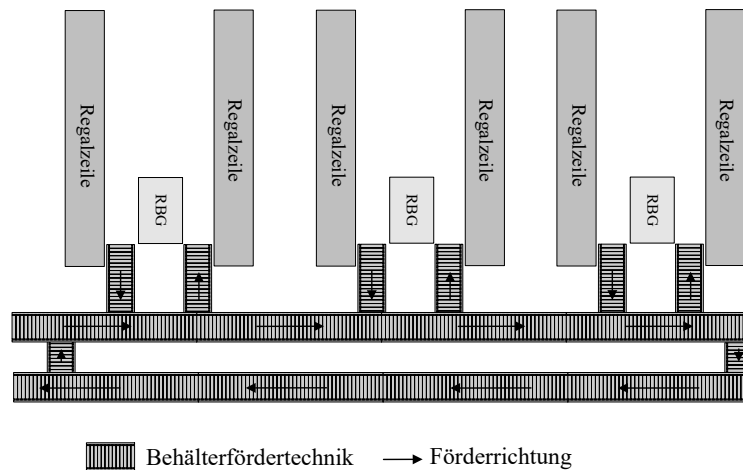


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung einer Lagervorzone

transportieren, wird Behälterrollenfördertechnik eingesetzt. Diese fördert das Gut aus dem Wareneingang zu den Übergabepunkten an der Kopfseite des AKLs. Hier nehmen die RBG die Behälter auf oder geben auszulagernde Behälter an die Fördertechnik ab. Diesen Bereich eines AKLs nennt man Vorzone (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 260). Die Abbildung 3.5 stellt diesen Bereich schematisch dar.

3.3 Leistungsbestimmung bei automatischen Kleinteilelagern

Die Leistung eines AKLs spielt für die Erfüllung der Logistikaufgabe eine entscheidende Rolle. Wird die Leistung nicht erfüllt, kommt es zu verspäteten Ein- bzw.

3 Automatische Kleinteilelager

Auslagerungen und der gesamte Fluss des Systems kann ins Stocken geraten. Im folgenden wird der Begriff Leistung in Verbindung mit einem AKL erläutert und es werden Methoden genannt, mit denen eine analytische Bestimmung der Leistung möglich ist.

Der wiederkehrende Bewegungsablauf von Unstetigförderern, zu denen auch das RBG zählt, wird Arbeitsspiel genannt. Ein Arbeitsspiel ist die Summe aus produktiven und unproduktiven Zeitanteilen. Unproduktive Zeitanteile sind bspw. Leerfahrten. Die Zeit, die ein Arbeitsspiel benötigt wird als Spielzeit bezeichnet. Arbeitsspiele werden in Einzel- bzw. Doppelspiele unterteilt (Arnold und Furmans 2009, S. 197).

Unter der Leistung eines AKLs versteht man die Anzahl an Einzel- bzw. Doppelspielen pro Stunde (Thomas 2008, S. 659).

Ein Einzelspiel kann eine Einlagerung oder eine Auslagerung sein. Bei einem Einlagerspiel wird ein Ladungsträger an dem Einlagerpunkt (E) aufgenommen und zu einem Fach (P1-E) transportiert und dort eingelagert. Anschließend fährt das RBG wieder zum Einlagerpunkt zurück. Bei einem Auslagerspiel startet das RBG am Auslagerpunkt (A) und fährt von dort zu einem Fach (P1-A) und lagert dort einen Ladungsträger aus. Dieser Ladungsträger wird anschließend zum Auslagerpunkt (A) transportiert. In 3.6(a) sind jeweils das Einlager- sowie Auslagerspiel graphisch dargestellt (nach FEM 9.851 Fall 1).

Unter einem Doppelspiel versteht man die Kombination aus Einlagerung und Auslagerung. 3.6(b) visualisiert ein mögliches Doppelspiel nach FEM 9.851 (Fall 1). Das RBG nimmt am Einlagerpunkt (E) einen Ladungsträger auf und transportiert diesen zu einem freien Regalfach (P1) und lagert diesen dort ein. Anschließend fährt das RBG zu einem belegten Regalfach (P2) und lagert den dortigen Behälter aus. Anschließend transportiert das RBG diesen zum Auslagerpunkt (A).

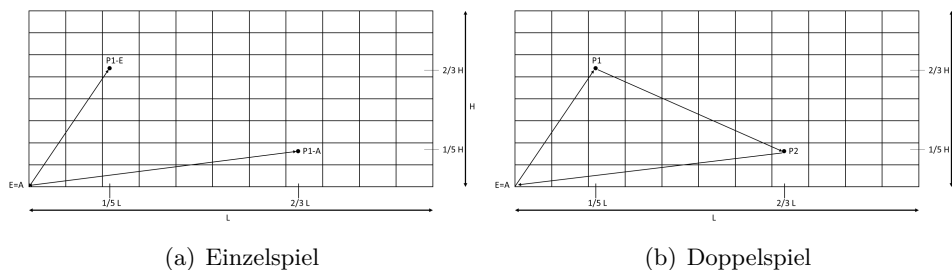


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung von Arbeitsspielen, eigene Darstellung nach (Federation Europeenne de la Manutention Sektion IX 2003)

Zur Berechnung der mittleren Spielzeiten eines automatischen Lagers werden die Richtlinien FEM 9.851 und VDI 3561 angewendet. Mit beiden ist der Leistungsnachweis möglich und anerkannt (Thomas 2008, S. 659).

Da es sich bei beiden Vorgehen um analytische Verfahren handelt, müssen eingangs Annahmen getroffen werden. Es handelt sich bei den Berechnungen um eine

idealisierte Regalanlage, bei der keine Unterscheidung zwischen Langsam- oder Schnelldreherzonen gemacht wird. Weiterhin geht man von einem gleichverteilten Zugriff auf alle Lagerplätze aus (Thomas 2008, S. 660). Es werden daher repräsentative Fächer ausgewählt, um aus der Anfahrzeit zu diesen Punkten und der Zeit über die Lastaufnahme/-abgabe die mittleren Spielzeiten zu berechnen. Basierend auf der Zeit für ein mittleres Arbeitsspiel lässt sich die Anzahl an Arbeitsspielen pro Stunde berechnen, was der Leistung des AKLs entspricht.

Weiterhin werden bei der FEM 9.851 noch weitere Fälle mit entsprechenden Anfahrpunkten unterschieden. Dies soll jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit sein, da hier die Simulation im Fokus steht. Für weitere Informationen sei auf die Richtlinien FEM 9.851 sowie VDI 3561 verwiesen (Federation Europeenne de la Manutention Sektion IX 2003; Verein Deutscher Ingenieure 1973).

3.4 Betriebsstrategien für den Betrieb automatischer Lager

Um die bestmögliche Leistung eines AKLs zu realisieren, werden diverse Betriebsstrategien für die Ein- bzw. Auslagerung eingesetzt.

Zur Führung und Optimierung von Lagersystemen, zu denen auch AKL gehören, werden LVS eingesetzt. Da sich viele Funktionen innerhalb eines Lagers ähneln, sind diese Standardprozesse bereits in Standardmodulen abgebildet. Diese können je nach Anforderungsprofil in einem modular aufgebauten Informationssystem zusammengestellt werden und bei Bedarf durch individuell programmierte Module ergänzt werden.

Bei der Lagerverwaltung im LVS wird jeder physische Lagerplatz im System widergespiegelt. Hierfür werden als Voraussetzung für diverse Lagerplatzvergabe-strategien die Gegebenheiten des Lagerplatzes, wie bspw. die Abmessungen, die Tragfähigkeit sowie die Fachkoordinaten als Ortsangabe erfasst. Neben diesen Parametern wird auch die Menge der Materialien pro Lagerplatz erfasst. Durch diese Verknüpfung wird es möglich, exakt nachvollziehen zu können, auf welchem Platz und in welcher Menge ein Artikel vorhanden ist. Neben diesen Informationen werden den Lagerplätzen verschiedene Status zugewiesen (gesperrt, reserviert, disponibel), um eine Übersicht der zur Verfügung stehenden Lagerplätze zu erhalten. Dies ist die informationstechnische Grundlage für die Durchführung von optimierten Ein- oder Auslagerungsvorgängen, um eine möglichst hohe Leistung zu erreichen (ten Hompel und Schmidt 2010, S. 54-55).

Im folgenden werden verschiedene Lagerbetriebsstrategien benannt sowie genauer erläutert. Lagerbetriebsstrategien werden sowohl für die Einlagerung als auch für die Auslagerung von Behältern angewendet. Hierfür werden spezielle Lagerplatzvergabe-strategien sowie Auslagerstrategien eingesetzt. Anschließend wird, basierend auf den Eigenschaften dieser Strategien, eine Empfehlung für den Einsatz im Kontext der Automobilindustrie gegeben.

3.4.1 Lagerplatzvergabestrategien

Bevor eine Ladeeinheit in das AKL eingelagert wird, erfolgt die Zuweisung eines Lagerplatzes. Die Zuweisung des Lagerplatzes hängt von verschiedenen Faktoren ab. So müssen bspw. die Fachabmessungen sowie die Abmessungen des LHM berücksichtigt werden. Aber auch Richtlinien für die Lagerung von Gefahrgut und andere gesetzliche Vorschriften müssen eingehalten werden (ten Hompel und Schmidt 2010, S. 31).

Festplatzlagerung

Bei der Festplatzlagerung wird einem Lagerfach genau ein Artikel zugeordnet. Diese strikte Zuordnung hat den Vorteil, dass bei Ausfall des LVSS trotzdem noch eine Zugriffssicherheit gewährleistet ist, da sich die Lagerplätze nicht ändern (ten Hompel und Schmidt 2010, S. 32). Neben dem Erhalt der Zugriffssicherheit, verringern sich in manuellen Lagern zusätzlich die Suchzeiten, da sich für den Kommissionierer ein Übungseffekt einstellt (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 106). Dieser Vorteil tritt in einem AKL jedoch nicht ein.

Chaotische Lagerung

Das extreme Gegenteil zur Festplatzlagerung ist die chaotische Lagerung, auch Freiplatzprinzip genannt (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 106; ten Hompel, Sadowsky und Beck 2011, S. 92). Bei diesem Prinzip werden die Materialien innerhalb der zulässigen Fachabmessungen etc. vom LVS einem beliebigen Lagerplatz zugeordnet. Neben diesen wesentlichen Parametern werden keine artikelspezifischen Merkmale (wie z.B. die Umschlagshäufigkeit) herangezogen (ten Hompel und Schmidt 2010, S. 32). Hierdurch wird die vorhandene Lagerkapazität bestmöglich genutzt (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 106).

Zonung

Die Lagerplatzvergabe in Zonen ist eine Weiterführung der chaotischen Lagerung. Hierbei wird die Umschlagshäufigkeit oder die Zugriffshäufigkeit der Artikel bei der Vergabe der Lagerplätze mit einbezogen (ten Hompel, Sadowsky und Beck 2011, S. 92).

Ziel dieser Strategie ist es, die durchschnittlichen Fahrwege zu minimieren und dadurch die Umschlagsleistung zu erhöhen (ten Hompel und Schmidt 2010, S. 32). Um diese Strategie anwenden zu können, müssen die Artikel im Vorfeld klassifiziert werden. Um diese Klassifizierung durchzuführen, wird eine ABC-Analyse durchgeführt. Anschließend wird den Artikeln eine eindeutige Klasse zugewiesen. Die Artikel mit der höchsten Häufigkeit (A-Artikel) werden als Schnelldreher, Artikel mit einer mittleren Häufigkeit (B-Artikel) werden als Mitteldreher und die Artikel mit der geringsten Häufigkeit (C-Artikel) werden als Langsamdreher bezeichnet (ten Hompel, Sadowsky und Beck 2011, S. 94). Das Verhältnis der Höhe zur Länge der Schnellläuferzone

3.4 Betriebsstrategien für den Betrieb automatischer Lager

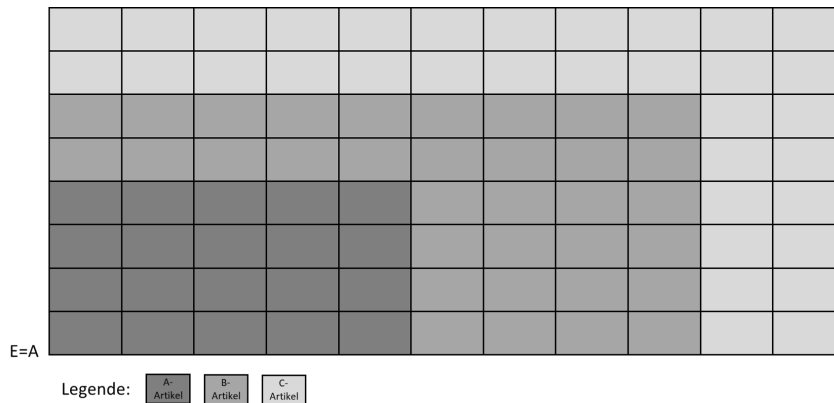


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung einer ABC-Clusterung, eigene Darstellung nach (Brandes 1997, S. 90)

entspricht dem Verhältnis von Hub- und Fahrgeschwindigkeit des RBG, (Brandes 1997, S. 90). In Abbildung 3.7 ist eine Regalwand im Schnitt zu sehen. Die A-Artikel werden nahe der Übergabepplätze für die Ein- bzw. Auslagerung eingelagert. Hierdurch ergeben sich für diese Artikel besonders kurze Wege. Um die A-Artikel werden die Mitteldreher gelagert. In den äußersten Regalfächern werden die C-Artikel eingelagert (ten Hompel, Sadowsky und Beck 2011, S. 94).

Querverteilung

Bei der Querverteilung werden mehrere Einheiten eines Artikels über mehrere Gassen gleichmäßig verteilt (ten Hompel und Schmidt 2010, S. 32) gelagert. Durch die gleichmäßige Verteilung der Behälter wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass dem RBG, welches als nächstes eine Auslagerung durchführen kann, der betreffende Auslagerauftrag zugeteilt wird. Dies führt zu einer gleichmäßigeren Auslastung der RBG und zum anderen zu einer höheren Wahrscheinlichkeit rechtzeitig erfüllter Aufträge. Zudem ist es möglich, bei Ausfall eines RBGs die benötigten Artikel mit Hilfe der anderen RBG dennoch auszulagern. Sind alle RBG aktiv, ist es durch parallel verlaufende Auslagerungen möglich, die Umschlagsleistung weiter zu erhöhen. (Brandes 1997, S. 150-151).

Durch Kombination der Strategien Querverteilung und Zonung ist es möglich, die Vorteile beider Strategien zu verbinden (ten Hompel, Sadowsky und Beck 2011, S. 32)..

3.4.2 Auslagerstrategien

Bei der Auslagerung geht es vorrangig um die Erhöhung der Umschlagsleistung (Heiserich, Helbig und Ullmann 2011, S. 68). Die Reihenfolge, in der die Auslagerungen getätigt werden, um diesem Ziel gerecht zu werden, bestimmen die Auslagerstrategien.

Um einen Überblick über die verschiedenen Strategien zu erhalten, werden im Folgenden einige Strategien benannt und erläutert.

FIFO

Wird nach dem FIFO (first in first out)-Prinzip gearbeitet, werden die ältesten Artikel als erstes wieder ausgelagert (Heiserich, Helbig und Ullmann 2011, S. 68). Durch dieses Vorgehen wird einer Überalterung der Artikel entgegengewirkt und die chargenreine Behandlung von Produktionsmaterial ist ebenfalls gewährleistet (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 107).

LIFO

Das Prinzip LIFO (last in first out) ist die gegenteilige Vorgehensweise zum FIFO-Prinzip. Bei diesem Prinzip werden die zuletzt eingelagerten Artikel wieder als erstes entnommen (Heiserich, Helbig und Ullmann 2011, S. 68; ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 107).

Kürzester Fahrweg

Wie bereits bei der Lagerplatzvergabe-strategie beschrieben, gibt es ebenfalls bei der Auslagerung die Strategie des kürzesten Fahrweges. Es werden die Artikel zur Auslagerung gewählt, die mit dem kürzesten Fahrweg zu erreichen sind. Durch die Minimierung der Fahrwege wird die Umschlagsleistung erhöht (ten Hompel und Schmidt 2010, S. 33).

Mengenanpassung

Bei der Mengenanpassung werden angebrochene und volle Ladeeinheiten ausgelagert, bei denen die wenigsten Zugriffe und Rücklagerungen zur Erfüllung des Kommissionierauftrages benötigt werden (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 107; ten Hompel und Schmidt 2010, S. 33). Durch diese Anpassung an die Kommissionieraufträge wird die Umschlagsleistung erhöht, da die Anzahl der Rücklagerungen minimiert wird und das RBG zielgerichteter für die Ein- und Auslageraufträge eingesetzt wird und nicht noch zusätzlich diverse Rücklagerungen durchführen muss (ten Hompel und Schmidt 2010, S. 33).

Restmengenbevorzugung

Um den Lagernutzungsgrad zu verbessern, wird die Strategie der Restmengenbevorzugung angewendet (ten Hompel und Schmidt 2010, S. 33). Dies bedeutet, dass stets die Ladeeinheit mit der geringsten Menge ausgelagert wird. Dadurch konzentriert sich die Gesamtmenge eines Artikels auf wenige Ladeeinheiten (ten Hompel, Schmidt und Nagel 2007, S. 107). Dies hat zur Folge, dass weniger angebrochene Ladeeinheiten gelagert werden und somit die Lagerkapazität besser genutzt wird. Auf

3.4 Betriebsstrategien für den Betrieb automatischer Lager

der anderen Seite kann es vorkommen, dass für einen Kommissionierauftrag mehr Behälter transportiert werden müssen als bei der Auslagerung eines vollen Gebindes.

Vorlaufzeitadaption

Unter der Vorlaufzeitadaption versteht man die vorausschauende Auslagerung von Artikeln, zeitlich deutlich vor dem benötigten Bereitstellungszeitpunkt (siehe Abbildung 3.8). Hierfür müssen jedoch Pufferflächen vorgehalten werden, um die Materialien zwischen der Auslagerung und dem Weitertransport zwischenzulagern. Durch die vorausschauende Auslagerung ist es möglich, Spitzenbelastungen entgegenzuwirken, für die die Anlagen nicht ausgelegt sind. Eine rechtzeitige Bereitstellung der Materialien ist somit dennoch möglich und es kann auf die Installation weiterer RBG sowie Gassen verzichtet werden. Hierfür müssen die Kosten für die Pufferflächen etc. natürlich günstiger sein, als die Erweiterung der Gassen- und RBG-Anzahl (Brandes 1997, S. 155).

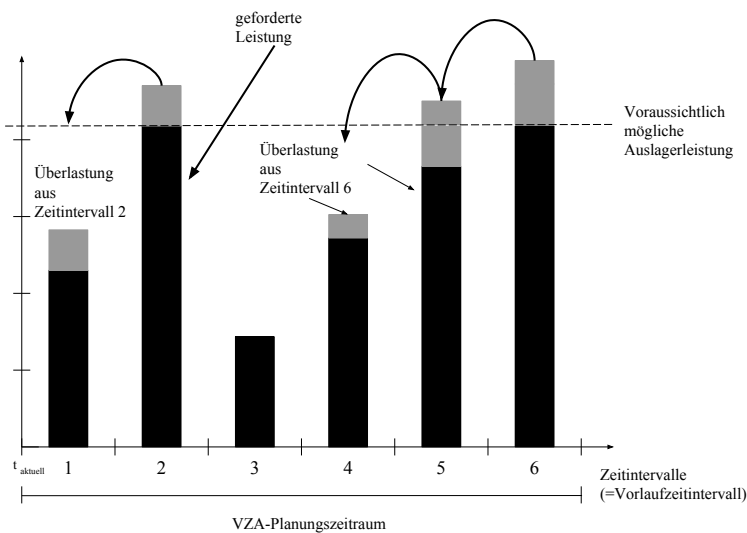


Abbildung 3.8: Schematischer Ablauf der Vorlaufzeitadaption, eigene Darstellung nach (Brandes 1997, S. 158)

3.4.3 Bewertung der Strategien zur Anwendung in der Automobilindustrie

Ein gemeinsames Ziel der genannten Strategien ist die rechtzeitige Bereitstellung der benötigten Materialien. Die optimalen Lagerbetriebsstrategien können je nach Struktur der Aufträge, der Ladungsträger oder dem Aufbau des AKLs variieren.

Unabhängig von der Unternehmung oder der Branche ist die rechtzeitige Bereitstellung der Materialien eine zentrale Prämisse bei dem Betrieb von AKL. Werden benötigte Materialien zu spät ausgelagert, gerät der gesamte Materialfluss ins Stocken und die nachgelagerten Prozesse können ihre wertschöpfenden Tätigkeiten nicht optimal durchführen (Brandes 1997, S. 42-43).

Im Kontext der Automobilproduktion nimmt die Logistik eine Schlüsselrolle ein. Nur durch die rechtzeitige sowie ausfallsichere Bereitstellung der Materialien kann die Produktion fortfahren (siehe hierzu Kapitel 2).

Zusätzlich zur rechtzeitigen Auslagerung müssen Lagersysteme im Kontext der Automobilindustrie besonders gegen Ausfälle abgesichert werden. Die Lieferfähigkeit, auch bei Ausfällen von Systemkomponenten spielt hier, im Vergleich zu anderen Branchen, eine entscheidende Rolle. Durch die Taktung der Montagelinie und das Perlenkettenprinzip in der Fertigung, führen nicht vorhandene Teile an den Verbauorten zu einer späteren Nachbearbeitung (wenn möglich) oder im schlimmsten Fall zu einem kompletten Bandstillstand (Trojan 2007, S. 13-14).

Um diese Gefahren zu minimieren sind redundante Systeme einzusetzen, bei denen durch die mehrfach vorhandenen Komponenten trotz Ausfall von Systemelementen, die anderen funktionierenden Komponenten die Logistikaufgaben dennoch erfüllen können (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 244-245). In redundanten Systemen sind z.B. RBG mehrfach vorhanden oder die Fördertechnik zur Ein- bzw. Auslagerung funktioniert unabhängig voneinander.

Um die Redundanz der Technik anwenden zu können, stellt die in Abschnitt 3.4.1 beschriebene Gassenquerverteilung eine besonders geeignete Strategie dar, da die Materialien hierbei gleichmäßig über alle Gassen verteilt gelagert werden. Auch bei Ausfall eines oder mehrerer RBG ist es dennoch möglich, die Materialien auszulagern. Der Betrieb des Lagers und die im Vordergrund stehende Versorgung der Montagelinie kann somit für eine gewisse Zeitdauer gewährleistet werden.

Weiterhin ist es zu empfehlen, zusätzlich eine Auslagerstrategie anzuwenden, um die rechtzeitige Bereitstellung der Materialien zu gewährleisten. Hierfür bietet es sich an, gewählte Auslagerstrategien mit der Vorlaufzeitadaption-Strategie zu kombinieren.

Aus dem Zeitpunkt der Bestellung resultiert der Belieferungszeitpunkt der Materialien. Basierend auf den Zeiten für die Auslagerung, die Verladung, den Transport sowie einkalkulierter Pufferzeiten, berechnet sich der Auslagerzeitpunkt. Die Materialien müssen also spätestens zu diesem Zeitpunkt ausgelagert werden, damit die folgenden Arbeitsschritte rechtzeitig ausgeführt werden können. Rechtzeitig impliziert allerdings auch, dass Aufträge vor diesem Zeitpunkt bearbeitet werden können, sofern ausreichend Pufferplätze vorhanden sind. Ist das AKL im betrachteten Zeitpunkt nicht stark ausgelastet, können Aufträge aus der nachfolgenden Periode bearbeitet werden (siehe Abbildung 3.8). In Abbildung 3.8 werden die Aufträge stets bis zur voraussichtlich maximal möglichen Leistung verschoben. Die Anlage würde daher stets an der Leistungsgrenze arbeiten.

Würde nun ein RBG ausfallen, könnten die geforderten Aufträge nicht erfüllt werden, da sich die mögliche Auslagerleistung auf alle vorhandenen RBG bezieht

3.4 Betriebsstrategien für den Betrieb automatischer Lager

und die resultierende Auslagerleistung geringer wäre als bei einem voll funktionsfähigen System. Darüber hinaus sollte ein AKL nicht dauerhaft an der Grenzleistung arbeiten, damit auftretende Schwankungen bei Ein- und Auslagerung abgefangen werden können. Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, ist die analytische Leistungsbeurteilung von automatischen Lagern ein idealisierter Ansatz, der keine Strategien oder Auftragsreihenfolgen berücksichtigt. Auch Simulationsläufe können nicht alle in der Zukunft auftretenden Ein- und Auslageraufträge bzw. resultierende Fahraufträge berücksichtigen. Es sollte daher bei beiden Ansätzen eine Leistungsreserve berücksichtigt werden. Hierbei gilt es eine Ausgewogenheit zwischen Auslastung und Leistungsreserve zu finden.

Geht man davon aus, dass diese Leistungsreserve in der Abbildung 3.8 berücksichtigt wurde, würde ein Ausfall eines oder mehrerer RBG die Leistung dennoch massiv beeinflussen.

In Hinblick auf die Automobilproduktion bietet es sich daher an, die Vorlaufadaption nicht nur von der möglichen Auslagerleistung abhängig zu machen, sondern auch von der Auslastung vorheriger Perioden. In Abbildung 3.8 ist bspw. deutlich zu erkennen, dass Periode drei sehr gering ausgelastet ist, wohingegen die Perioden vier, fünf und sechs deutlich stärker ausgelastet sind. Ein Ausfall eines RBGs in Periode drei könnte daher leichter kompensiert werden, als etwa ein Ausfall in der Folgeperiode. Weiterhin hat die Nicht-Erfüllung eines Auftrages, der in einer früheren Periode eingelastet wurde als benötigt, geringere Auswirkungen auf das nachfolgende System als ein nicht erfüllter Auftrag, der zu nicht in der spätest möglichen Periode erfüllt wurde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Kontext, in dem das AKL arbeitet grundsätzlich keinen Einfluss auf die Betriebsstrategie hat. Ziel sollte es immer sein, die optimale Leistung unter möglichst geringem Ressourceneinsatz zu erzielen. Die Gewährleistung der Lieferfähigkeit, auch bei Ausfall von RBG, stellt eine Besonderheit in der Automobilproduktion dar. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sollte bei Einsatz der Gassenquerverteilung und der Vorlaufzeitadaption in Betracht gezogen werden. Um weitere Leistungsverbesserungen zu erzielen, ist der Einsatz dieser Strategien in Verbindung mit anderen optimierenden Betriebsstrategien, zu prüfen.

4 Ereignisdiskrete Simulation

Simulation ist ein geeignetes und anerkanntes Hilfsmittel, das bei der Planung, Realisierung und dem Betrieb von logistischen Systemen eingesetzt wird (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 4). Entgegen früherer Ansätze, bei denen die Simulation zur Absicherung der Planungsergebnisse herangezogen wurde, findet die Simulation heute durchgehend in allen Phasen von der Planung, über die Realisierung bis in den laufenden Betrieb Anwendung (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 4; Daniluk und Chizu 2010, S. 150). Um den steigenden wirtschaftlichen Anforderungen, denen Unternehmungen in der heutigen Zeit ausgesetzt sind, gerecht zu werden, gewinnen Simulationswerkzeuge immer mehr an Bedeutung (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 5). Die positive Entwicklung der Computertechnik, mit immer leistungsstärkeren Recheneinheiten, begünstigt diese Entwicklung zusätzlich (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 4-5), da somit immer komplexere Modelle in immer kürzeren Zeiteinheiten gelöst werden können.

4.1 Begriffsdefinitionen

In diesem Abschnitt werden Begriffsdefinitionen genannt, um ein einheitliches Verständnis dieser im Zusammenhang mit Simulation genutzten Begriffe zu gewährleisten.

Simulation

„[Simulation ist das] 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.“ (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 3)

System

„Eine von ihrer Umwelt abgegrenzte Menge von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen“, wird als System bezeichnet (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 4). Hierbei bezieht sich der VDI auf die (DIN IEC 60050-351 2014, S. 29).

Ein System ist durch Systemgrenzen von der Umwelt abgegrenzt. Über Schnittstellen findet ein Austausch von Informationen, Materie und Energie mit der Umwelt statt. Diese sogenannten Eingangsgrößen werden in das System hineingegeben, transformiert und als Ausgangsgrößen aus dem System herausgegeben. Ein System kann wiederum weitere Systeme beinhalten. Diese Subsysteme können ebenfalls Subsysteme enthalten. Allerdings sind ebenso einzelne Systemelemente Teil der Systeme. Der Abstraktionsgrad hat demnach

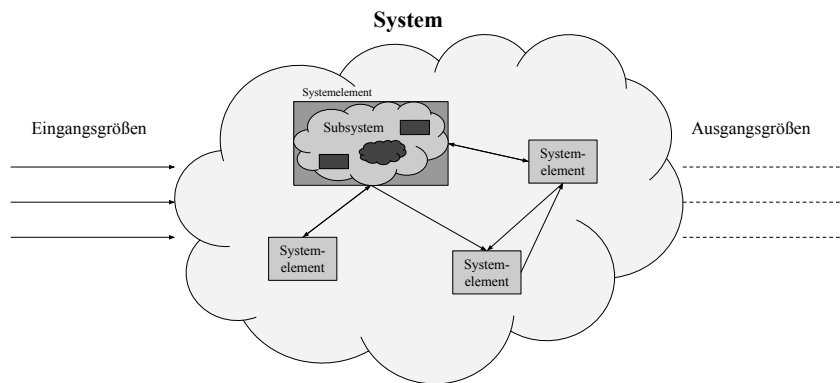


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung eines Systems, eigene Darstellung nach (Gutenschwager u. a. 2017, S. 12)

einen entscheidenden Einfluss auf das wahrgenommene System (Gutenschwager u. a. 2017, S. 11). Die Elemente können verschiedene Zustände aufweisen, die durch die Werte der Elementattribute beschrieben werden. Die Attribute können entweder konstante Werte aufweisen oder aber variable Zustände des Elements widerspiegeln. Die Zustandsübergänge können diskret oder kontinuierlich ablaufen (siehe hierzu Abschnitt 4.3). Dies hängt stets von dem im System ablaufenden Prozess ab. (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 4)

Parameter

Parameter beschreiben technische Merkmale eines Objektes (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 171). Dies können bspw. die Abmessungen oder die Bewegungseigenschaften wie Beschleunigung oder Geschwindigkeit eines Objektes sein. Neben diesen physischen Werten können aber auch steuerungsrelevante Parameter von Objekten, wie z. B. das Einlagerdatum oder die Klassifizierung (siehe hierzu Abschnitt 3.4), berücksichtigt werden (ten Hompel und Schmidt 2010, S. 26).

Simulationsexperiment

Als Simulationsexperiment versteht man die „(g)ezielte empirische Untersuchung des Verhaltens eines Modells durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parameter- oder Strukturvariation“ (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 3).

Modell

Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines bestehenden bzw. geplanten Systems oder Prozesses (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 3). Das Original und das Modell unterscheiden „sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen

Toleranzrahmens “(Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 3). Aus dieser Definition wird deutlich, dass die Modellbildung stets dem Untersuchungsziel folgen muss. Bevor mit der Modellbildung begonnen werden kann, sollten die zu betrachtenden Prozesse, die dazu relevanten Kenngrößen und die notwendigen Randbedingungen definiert werden (Rabe 1998, S. 3).

Der aus diesen Überlegungen resultierende Detaillierungsgrad entscheidet maßgeblich über die Qualität des Modells und den daraus gewonnenen Ergebnissen. Werden bei der Modellierung eines Systems zu viele Elemente und Prozesse ignoriert, liegt ein ungenaues Modell vor und die gewonnenen Ergebnisse sind häufig zu ungenau und können für folgende Interpretationen des untersuchten Systems nicht verwendet werden. Wird der Detaillierungsgrad hingegen zu fein gewählt, steigt gleichzeitig die Zeit für die Erstellung des Modells sowie für die Berechnung der folgenden Experimente.

Bei der Durchführung einer Simulationsstudie ist die zur Verfügung stehende Zeit häufig begrenzt (z.B. ein projektorientiertes Umfeld). Durch den zeitlichen Mehraufwand für die Erstellung und die Berechnung eines sehr detaillierten Modells bleibt weniger Zeit für die Durchführung der einzelnen Experimente. Dies führt dazu, dass die Aussagekraft der Ergebnisse abnimmt, obwohl ein hoher Detaillierungsgrad gewählt wurde (Rabe 1998, S. 3).

Ein Modell sollte daher immer so ungenau wie möglich, jedoch so genau wie nötig erstellt werden (ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation 1997, S. 7).

4.2 Stochastische Grundlagen

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über die Notwendigkeit der Stochastik für die Simulation von logistischen Prozessen geben.

Stochastik „kann als Mathematik des Zufalls bezeichnet werden“ (Henze 2017, S. 1).

Ereignisse werden dann als zufällig bezeichnet, wenn die möglichen Ergebnisse einer Aktion bekannt sind, es aber nicht möglich ist, vorherzusagen welches der möglichen Ergebnisse nach Ausführen der Aktion eintritt (Gutenschwager u. a. 2017, S. 85). Ein prominentes Beispiel ist das Werfen einer Münze. Eine Münze hat zwei Seiten, Kopf oder Zahl. Welche der Seite nach dem Wurf oben liegt, ist ohne aufwendige Berechnungen, die die Anzahl der Drehungen in der Luft, den Luftwiderstand oder die Wurfgeschwindigkeit berücksichtigten, nicht möglich. In diesen Fällen wird von zufälligen Ergebnissen gesprochen (Barot und Hromkovič 2017, S. 1).

Bei logistischen Prozessen können ebenfalls stochastische anstatt deterministische Größen zu Grunde liegen, die das Verhalten des Systems stark beeinflussen können (Gutenschwager u. a. 2017, S. 86).

Betrachtet man lediglich die theoretisch mögliche Leistung von Teilsystemen, besteht die Möglichkeit, dass angrenzende Systeme anders dimensioniert werden, als benötigt.

Dies wird an dem Beispiel eines Gabelstaplers, der Paletten von einer Übergabestelle entnimmt, deutlich.

Sollte der Gabelstapler, durch eine technische Störung oder durch die Behinderung von anderen Elementen des Systems (siehe hierzu Abschnitt 4.1), nicht in dem berechneten Takt die Paletten aufnehmen können, würden mehr Pufferplätze als angenommen benötigt, da das vorgeschaltete System ohne Störung arbeitet und die Pufferplätze stetig mit Ware versorgt. Dieser Engpass kann sich nun rückwirkend auf das restliche System auswirken und Störungen oder Stillstände hervorrufen. Würde hingegen die Ausfallzeiten des Gabelstaplers berücksichtigt, würden mehr Pufferplätze zur Verfügung stehen und die Auswirkungen auf das restliche System wären geringer (Gutenschwager u. a. 2017, S. 86-87).

Aus diesem Grund ist es sinnvoll, das Verhalten der einzelnen Systeme zu erfassen, wenn nötig graphisch darzustellen und daraus Ergebnisse abzuleiten, die das Verhalten stochastisch möglichst genau widerspiegeln.

Eine Abhandlung dieses Themengebietes ist in dieser Kürze und dem Fokus dieser Arbeit nicht möglich. Dieser Abschnitt soll allerdings das Bewusstsein in Bezug auf die Konzeptmodellierung schaffen, bereits in dieser Phase Parameter zu berücksichtigen, die statt deterministischen Werten, wie z. B. Fördergeschwindigkeiten auch stochastische Größen wie bspw. Ausfallzeiten zu berücksichtigen. Weiterführende Informationen zu diesem Thema sind z. B. in den Werken von (Barot und Hromkovič 2017; Henze 2017) zu entnehmen.

4.3 Grundlagen ereignisdiskreter Simulation

Systeme können in kontinuierliche oder in diskrete Systeme unterschieden werden (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 4). Da bei der Simulation ein System „mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell“ (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 3) nachgebildet wird, kann man folglich bei der Simulation auch zwischen kontinuierlicher und diskreter Simulation unterscheiden.

Es wird zwischen diskreten und kontinuierlichen Zeit- und Zustandsmengen unterschieden (siehe Abbildung 4.2). Kontinuierliche bzw. diskrete Zeitmengen beziehen sich dabei auf die „Art des internen Zeitfortschrittsmechanismus“ (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 12). Bei kontinuierlichen Simulationen „geht man davon aus, dass sich der Zustand des Modells stetig mit der Zeit verändert“ (Mattern und Mehl 1989, S. 200).

Bei kontinuierlichen Betrachtungen der Zeit wird eine Zeitmenge T , bestehend aus den positiven reellen Zahlen einschließlich der Null, zugrunde gelegt. Wird die Zeit hingegen diskret betrachtet, wird die Zeitmenge T durch eine abzählbare Menge von Zeitpunkten t_1, t_2, \dots, t_n definiert. Die Abstände zwischen den einzelnen Zeitpunkten sind stets gleich (Gutenschwager u. a. 2017, S. 15-16).

Neben der Zeitmenge kann die Zustandsmenge Z ebenfalls diskret oder kontinuierlich sein. Am Beispiel eines Motors wären die diskreten Zustände $z_1 = \text{aus}$ und $z_2 = \text{ein}$. Würde man für den Motor hingegen eine kontinuierliche Zustandsmenge

zugrunde legen, könnte mit dieser Zustandsmenge die Drehzahl des Motors abgebildet werden (Gutenschwager u. a. 2017, S. 16).

Wie in Abbildung 4.2 zu sehen, können diese beiden Mengen auch in Verbindung zueinander betrachtet werden. Die Abbildung 4.2 zeigt die daraus resultierenden Zustandsmengen-Zeitmengen-Diagramme. Bei kontinuierlichen Simulationen „geht

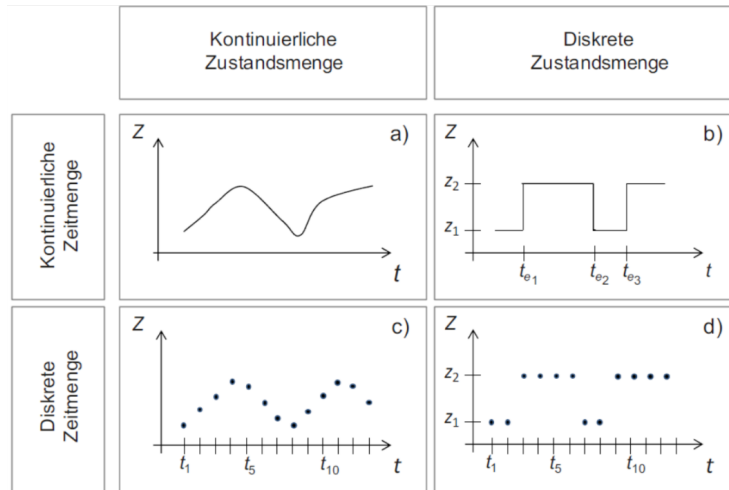


Abbildung 4.2: Beziehung von Zustands- und Zeitmenge sowie die daraus resultierenden Zustandsübergänge (Gutenschwager u. a. 2017, S. 16)

man davon aus, dass sich der Zustand des Modells stetig mit der Zeit verändert“ (Mattern und Mehl 1989, S. 200) (siehe Abbildung 4.2 a). Betrachtet man eine kontinuierliche Zustandsmenge zu diskreten Zeitpunkten, können sich die Zustände nur zu diesen definierten Zeitpunkten verändern. Wie in Abbildung 4.2 c zu erkennen, hat dabei die Größe der festgelegten Zeitintervalle einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse. Je kleiner die Zeitintervalle gewählt werden, desto genauer sind die Simulationsergebnisse, da häufiger die Zustände und Werte der Elemente aktualisiert bzw. überprüft werden. Allerdings sollten diese Intervalle nicht zu klein gewählt werden, damit die Simulation effizient ablaufen kann. Die optimale Größe dieser Intervalle hängt von dem Anwendungsgebiet ab und kann von einigen Nanosekunden bis zu einigen Minuten dauern (Mattern und Mehl 1989, S. 200, 1989, S. 203).

Betrachtet man eine diskrete Zustandsmenge über eine kontinuierliche Zeit, wie in Abbildung 4.2 b dargestellt, wird das zusammenhängende charakteristische Treppemuster deutlich. Die Zustände können sich prinzipiell zu jeder Zeit verändern. Tritt eine Änderung ein, erfolgt diese jedoch sprunghaft (analog zu dem Motorenbeispiel: an oder aus).

Diskrete Zustandsmengen zu einer diskreten Zeitmenge betrachtet, ergeben das in Abbildung 4.2 d dargestellte Diagramm. Die Zustände werden diskret über die Zeit betrachtet. Da sich aber auch die Zustände diskret verhalten, ändern sich diese nur

sprunghaft und die dargestellte gepunktete Treppe entsteht. Da bei der diskreten Simulation die Elemente nur endlich viele Zustände annehmen können (Mattern und Mehl 1989, S. 201; Fröming 2009, S. 124; ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation 1997, S. 5), ist es möglich, dass sich die Zustände während der Betrachtung nicht verändern. Da zu unterschiedlichen diskreten Zeitpunkten die Zustände betrachtet werden, entsteht ein Treppemuster, bei denen zu unterschiedlichen Zeitpunkten gleiche Zustände möglich sind.

Für die Simulation von logistischen Prozessen, die in dieser Arbeit behandelt werden, findet die diskrete Simulation Anwendung (Eley 2012, S. 8). Für die Betrachtung des Materialflusses ist z.B. die Veränderung eines sich in Bearbeitung befindenden Werkstücks nicht von Relevanz. Relevant sind die Ereignisse des Bearbeitungsbeginns und dessen Beendigung, um darauf aufbauend eine Materialbewegung zu realisieren (Eley 2012, S. 8).

Da die kontinuierliche Simulation häufig bei physikalischen Fragestellungen und weniger bei logistischen Systemen Anwendung findet, soll hier nicht weiter auf diese Art der Simulation eingegangen werden.

Bei diskreten Simulationen kann die Zeitfortschreibung ereignisgesteuert oder zeitgesteuert erfolgen (Gutenschwager u. a. 2017, S. 52). Bei der zeitgesteuerten Zeitfortschreibung schreitet die Zeit in festgelegten, immer gleichen Schritten voran. Zustandsänderungen, die zwischen den betrachteten Zeitpunkten erfolgen, werden am Ende des betrachteten Zeitraums gesammelt verarbeitet. Die zeitliche Abfolge der erfolgten Ereignisse spielt dabei keine Rolle (Gutenschwager u. a. 2017, S. 52-53). Da sich dieses Kapitel und die vorliegende Arbeit vorrangig mit der ereignisdiskreten Simulation beschäftigt, wird im folgenden nicht weiter auf die zeitgesteuerte Simulation eingegangen.

Bei der ereignisgesteuerten Simulation werden Zustandsänderungen nicht durch den Ablauf der Zeit verursacht, sondern durch den Eintritt eines „atomaren, d. h. keine Simulationszeit verbrauchenden Ereignisses“ (Mattern und Mehl 1989, S. 201). Zustandsänderungen finden daher nicht zwischen Ereignissen statt, weshalb nach dem Eintreten eines Ereignisses direkt ein Folgeereignis feststehen muss (Mattern und Mehl 1989, S. 201). Alle bereits bekannten Folgeereignisse werden chronologisch nach ihrem Zeitstempel in der Ereignisliste verwaltet. Durch die Ablaufsteuerung wird jeweils das erste Ereignis aus dieser Liste gelöscht und die Simulationszeit wird an den entsprechenden Zeitstempel angeglichen. Anschließend wird die Zustandsänderung, die durch dieses Ereignis hervorgerufen wird, durchgeführt. Dementsprechend wird das nächste Ereignis in der Liste ausgeführt (Gutenschwager u. a. 2017, S. 55). In Abbildung 4.3 ist ein ereignisorientierter Simulationslauf schematisch abgebildet. Die grauen Punkte symbolisieren bereits ausgeführte Ereignisse, so z.B. e_0 . Zum Betrachtungszeitpunkt 4,2 sind bereits eingeplante Ereignisse mit schwarzen Punkten dargestellt. Im Verlauf der Simulation werden weitere Ereignisse hinzukommen, bei denen zum momentanen Zeitpunkt jedoch nicht bekannt ist, von welchem Ereignis diese verursacht werden. Das Ereignis e_3 könnte in diesem Beispiel entweder von e_1 oder e_2 verursacht werden.

4.4 Anwendungsgebiete ereignisdiskreter Simulation

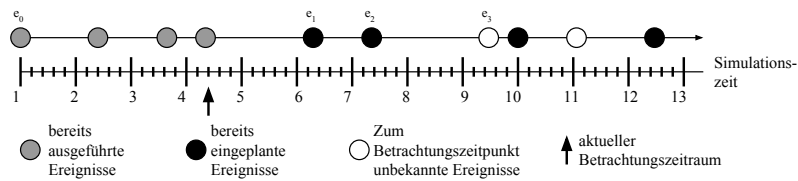


Abbildung 4.3: Schematischer Ablauf einer ereignisdiskreten Simulation (Mattern und Mehl 1989, S. 201)

4.4 Anwendungsgebiete ereignisdiskreter Simulation

Wie eingangs bereits beschrieben, wird Simulation im gesamten Zyklus eines logistischen Systems eingesetzt (Daniluk und Chizu 2010, S. 150). Gerade in hochdynamischen Materialflusssystemen, in denen häufig viele Prozesse gleichzeitig vonstatten gehen, ist die Simulation analytischen Methoden überlegen und daher ein fester Bestandteil (Daniluk und Chizu 2010, S. 150).

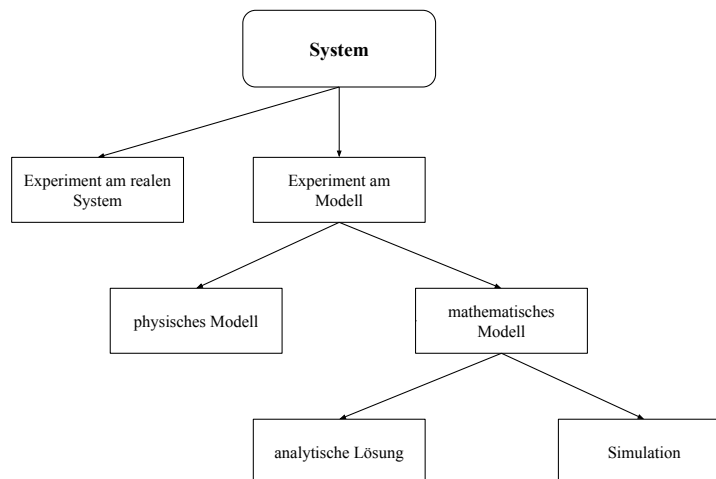


Abbildung 4.4: Methoden zur Untersuchung eines Systems (Daniluk und Chizu 2010, S. 150)

Wie in Abbildung 4.4 zu erkennen, gehören sowohl Simulationsmodelle als auch analytische Methoden zu den mathematischen Modellen. Im Gegensatz dazu stehen die physischen Modelle. Insbesondere bei der Analyse von beliebigen, hochdynamischen Materialflusssystemen kommen analytische Methoden schnell an ihre Grenzen. So ist es mit Hilfe dieser Methoden zwar möglich, die Leistung bzw. den Durchsatz der einzelnen Komponenten (Gabelstapler, Fördertechnik, RBG etc.) zu berechnen,

4 Ereignisdiskrete Simulation

jedoch sagt dieser errechnete Wert der einzelnen Komponenten nichts über das Zusammenspiel dieser Komponenten in bestimmten Situationen aus und betrachtet daher auch nicht die resultierende Gesamtleistung des Systems. Um die stochastischen Einflüsse, denen eine solche Anlage unterliegt, abzubilden, werden daher Simulationsmodelle erstellt, mit denen die Handhabung dieser Einflüsse leichter möglich ist (Daniluk und Chizu 2010, S. 150). Losgelöst von speziellen Anwendungsfällen (z.B. Warenumschlag oder Fertigung) wird Simulation immer dann eingesetzt, wenn

- Neuland beschritten wird,
- Experimente am realen System zu kostenintensiv oder nicht möglich sind,
- analytische Methoden ihre Grenzen erreichen,
- komplexe Wirkzusammenhänge die menschliche Vorstellungskraft überfordern.

(ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation 1997, S. 6).

Die Tabelle 4.1 zeigt die einzelnen Phasen des Lebenszyklus von technischen Anlagen und einige daraus resultierende Anwendungsfelder für die Simulation.

Tabelle 4.1: Simulation in Produktion und Logistik (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 4-9; Daniluk und Chizu 2010, S. 150)

Phase	Anwendungsfelder der Simulation
Planung	- Verbesserung vorhandener Anlagen - Überprüfung neugeplanter Anlagenkonzepte - Bewertung von Alternativen - Entwurf von Steuerungsstrategien
Realisierung	- Entwicklung und Test von Steuerungssoftware - Ermittlung des Anlaufverhaltens der Anlage - Mitarbeiterschulung
Betrieb	- Vergleichende Untersuchung von Strategien und Ablaufvarianten - Reihenfolgeoptimierung von Prozessabläufen - Strategien bei Störfällen - Mitarbeiterschulung

Wie der Tabelle 4.1 zu entnehmen ist, können im Rahmen der Planung entwickelte Planungsergebnisse bspw. mit Hilfe einer Simulationsstudie überprüft werden. Etwaige Engpässe innerhalb des Materialflusses können so identifiziert werden. Basierend auf diesen Ergebnissen können neue Prozessvarianten erarbeitet werden, die anschließend einer neuen Untersuchung unterzogen werden.

Bereits bestehende Anlagen können auf ihr mögliches Potential hin untersucht werden. So können von den Planern identifizierte Schwachstellen verändert und

deren Auswirkungen auf das Realsystem untersucht und bewertet werden. Welche Faktoren wie und in welchem Maße verändert werden, entscheiden die Planer und nicht das Simulationsmodell. An diesen Beispielen wird deutlich, dass Simulation kein Ersatz für eine fundierte Planung ist und lediglich ein Hilfsmittel zur Lösung dieser Probleme darstellt. Die Simulationsexperten und die Planer sollten daher stets zusammenarbeiten bzw. Rücksprache untereinander halten, um ein bestmögliches Ergebnis zu erhalten (ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation 1997, S. 7).

Im Rahmen der Realisierung kann durch Simulationen das Anlaufverhalten der Anlage untersucht werden. Mittels Simulation ist es möglich, die Anlaufkurve des Systems zu ermitteln und evtl. Betriebsstrategien für die Befüllung des Lagers anzupassen.

Während des laufenden Betriebs eines Logistiksystems ist es durch Simulation möglich, zu überprüfen, wie sich das System bei bestimmten Lagerstrategien (siehe hierzu Abschnitt 3.4) verhält.

Weitere Beispiele sind der Tabelle 4.1 zu entnehmen. Aufgrund der Deutlichkeit der bisher aufgeführten Beispiele, wird im Rahmen dieser Ausführungen darauf verzichtet, die anderen Beispiele zu erläutern. Ebenso handelt es sich bei dieser Tabelle nicht um eine vollständige Tabelle. Die Anwendungsbereiche für die Simulation in Produktion und Logistik sind ähnlich vielfältig wie die Anwendungsbereiche in diesen Disziplinen selbst.

4.5 Ablauf einer Simulationsstudie

Losgelöst von verschiedenen Vorgehensschemata zur Durchführung einer Simulationsstudie müssen die nachfolgenden Schritte betrachtet werden, die in allen Simulationsprojekten gleich sind:

- Problemformulierung
- Prüfung der Simulationswürdigkeit
- Zielformulierung
- Datenbeschaffung und -analyse
- Modellaufbau
- Simulationsläufe
- Ergebnisüberprüfung und -analyse

(Baron u. a. 2001, S. 122).

Rabe, Spieckermann und Wenzel haben in 2008 ein Modell entwickelt, welches im deutschsprachigen Raum große Bedeutung besitzt. So wird bspw. in diversen Ausschreibungsunterlagen von deutschen Automobilherstellern auf diese Richtlinie

4 Ereignisdiskrete Simulation

verwiesen (Rabe, Spieckermann und Wenzel 2008, S. 30-31) und auch der VDI hat dieses Vorgehensschema als gültig anerkannt und übernimmt dieses in der Richtlinie VDI 3633 (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 19).

Da sich die vorliegende Arbeit im Kontext der Automobilindustrie bewegt, wird auf andere Vorgehensweisen nicht weiter eingegangen. Im folgenden werden die einzelnen Schritte, die es in dieser Richtlinie zu durchlaufen gilt näher erläutert. Um den Rahmen dieser Einführung nicht zu sprengen, werden lediglich die Grundlagen der notwendigen Schritte und das Zusammenspiel dieser erläutert. Für weitere Informationen sei hier auf die Richtlinie VDI 3633 verwiesen, in der auf die Besonderheiten genauer eingegangen wird.

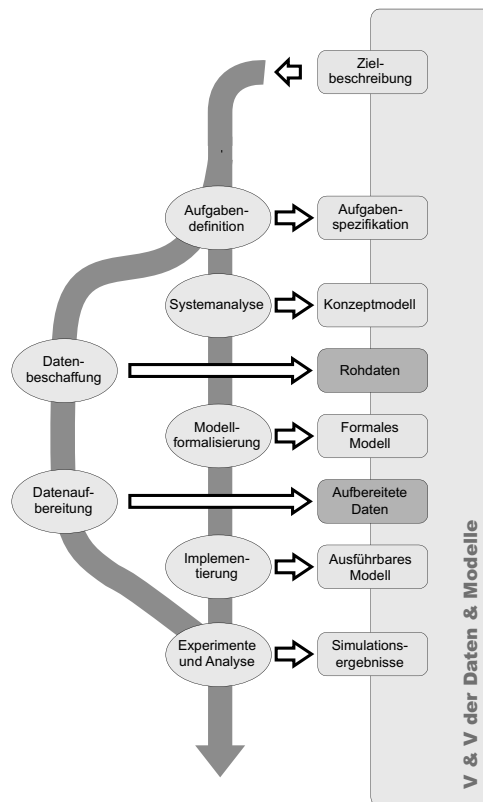


Abbildung 4.5: Vorgehensschema zur Durchführung einer Simulationsstudie (Rabe, Spieckermann und Wenzel 2008, S. 32)

Die Abbildung 4.5 visualisiert diesen Ablauf, und im Folgenden werden die darin enthaltenen Schritte näher erläutert.

Die dargestellten Ellipsen stellen die Phasen, in die diese Vorgehensweise gegliedert ist, dar. Konkret handelt es sich hierbei um:

- Aufgabendefinition,

- Systemanalyse,
- Modellformalisierung,
- Implementierung und
- Experimente und Analyse.

(siehe Abbildung 4.5)

Parallel zu den genannten Phasen verlaufen die Phasen

- Datenbeschaffung sowie
- Datenaufbereitung

(Rabe, Spieckermann und Wenzel 2008, S. 32).

Da die Datenbeschaffung losgelöst von der Modellerstellung verläuft und je nach Anwendungsfall der Simulationsstudie in den Aufgabenbereich des Auftraggebers fällt, ist es möglich diese beiden Phasen parallel durchzuführen (Baron u. a. 2001, S. 126). Die Datenbeschaffung sowie -aufbereitung kann jedoch nicht beliebig parallel verlaufen, sondern muss vor dem Beginn der Experimente abgeschlossen sein (Rabe, Spieckermann und Wenzel 2008, S. 32). Die rechteckigen Kästen repräsentieren die jeweiligen Phasenergebnisse (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 18).

Die Richtigkeit und Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse auf das Originalsystem sind von erheblicher Bedeutung, da die Simulation häufig Entscheidungen von erheblicher Tragweite unterstützt und Fehlentscheidungen aufgrund falscher Simulationsergebnisse erhebliche Kosten verursachen (Rabe, Spieckermann und Wenzel 2008, S. 1). Aus diesem Grund unterliegen alle Phasenergebnisse einer Verifikation und Validierung (V&V) (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 18).

Im Rahmen der Vorbereitung müssen zunächst einige Grundsatzentscheidungen getroffen werden. So ist zum einen zu klären, ob das vorliegende Problem simulationstauglich ist. Im Rahmen dieser Prüfung müssen u.a. folgende Aspekte betrachtet werden:

- Fehlen alternativer analytischer Lösungsmethoden
- Erwarteter Nutzen aus der Simulation
- Bestimmung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses
- Komplexität der Aufgabe

(Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 19-20). Neben dieser Fragestellung muss zusätzlich entschieden werden, wer die Simulationsstudie durchführt. Dies kann entweder von Mitarbeitern im eigenen Unternehmen durchgeführt werden, oder aber von externen Dienstleistern. Da diese Fragestellung für die Beantwortung der Aufgabenstellung nicht von Bedeutung ist, sei hier auf die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 2 verwiesen,

in der diese Fragestellung detailliert beleuchtet wird (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 21).

Nachdem nun die grundsätzlichen Fragestellungen beantwortet wurden, müssen sowohl eine Zielbeschreibung sowie eine Aufgabendefinition erarbeitet werden.

Die Zielbeschreibung definiert das Gesamtziel sowie daraus resultierende und miteinander in Beziehung stehende Teilziele. Zudem muss geprüft werden, ob sich die Teilziele ergänzen oder widersprechen. Durch die Aufgabendefinition werden die Aufgaben, die durch die Simulation durchzuführen sind, festgelegt (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 21).

Im Rahmen der Systemanalyse, aus der als Phasenergebnis ein Konzeptmodell folgt, werden die Systemgrenzen definiert und die Komplexität des Realsystems gemäß den Untersuchungszielen verringert. Parallel zur Systemanalyse muss die Datenbasis für das Simulationsmodell beschafft und aufbereitet werden. So stehen zu Beginn die Rohdaten zur Verfügung, die anschließend in aufbereitete Daten überführt werden. Die Daten dienen der Beschreibung der Systemkomponenten oder der Systemlast. Bei bereits existierenden Systemen gestaltet sich die Beschaffung der Daten einfacher als bei Systemen, die noch in Planung sind. Hier können die Daten in Form von Erfahrungswerten oder exakten Arbeitsplänen ermittelt werden. Bei geplanten Systemen kann es hingegen hilfreich sein, Daten aus vergleichbaren, bestehenden Systemen heranzuziehen, um eine Datengrundlage für die Simulation zu schaffen (Daniluk und Chizu 2010, S. 152).

Im Anschluss an die Systemanalyse werden die Phasen Modellformalisierung sowie Implementierung durchgeführt. In dem formalen Modell werden die logischen Strukturen sowie die Materialflüsse des zu beschreibenden Systems aufgezeigt. Hierfür werden bspw. Fluss- oder Blockdiagramme eingesetzt (Daniluk und Chizu 2010, S. 152). Die Modellformalisierung ist ein vorbereitender Schritt für die folgende Implementierung und stellt ein „wesentliches Qualitätskriterium für eine hochwertige Simulationsstudie“ (Daniluk und Chizu 2010, S. 152) dar. In der darauf aufbauenden Implementierungsphase wird das zuvor erstellte Konzeptmodell schrittweise in ein Simulationsmodell umgewandelt. Hierfür stehen entweder Programmiersprachen oder aber spezielle Simulationswerkzeuge mit einer Modellbibliothek zur Verfügung (Daniluk und Chizu 2010, S. 152).

Die Phase der Experimente und Analyse schließt sich direkt an die Phase der Implementierung an. In dieser Phase laufen die bisher parallel bearbeiteten Prozesse der Datenbeschaffung und -analyse und der Modellerstellung zusammen (siehe Abbildung 4.5). Bevor die Experimente durchgeführt werden, sollte ein Versuchsplan erstellt werden. Durch diesen Plan werden die Vorgehensweisen und die Reihenfolgen der durchzuführenden Experimente definiert (Baron u. a. 2001, S. 127). Die Simulation wird nun gemäß dieses Planes mit verschiedenen Parametern ausgeführt.

Im Anschluss an diese Experimente werden die gewonnenen Simulationsergebnisse aufbereitet und interpretiert (Daniluk und Chizu 2010, S. 152). Diese Ergebnisse werden an definierten Messpunkten im Modell gewonnen und liefern Rückmeldungen über das Verhalten des simulierten Systems (Verein Deutscher Ingenieure VDI 2014, S. 36).

Die Darstellungsformen der Simulationsergebnisse lassen sich dabei in

- Animation (dynamische Anzeige der Zustandsänderungen des Modells während der Simulation)
- Monitoring (dynamische Anzeige von Zustandsgrößen wie beispielsweise Durchsatz in graphischer oder textueller Form während des Simulationslaufs)
- Statistiken (Darstellung der Ergebnisdaten der Simulation in textueller oder graphischer Form am Ende der Simulation)

gliedern (Daniluk und Chizu 2010, S. 153).

5 Entwicklung eines Konzeptmodells

In diesem Kapitel wird gemäß dem in Abbildung 4.5 vorgestellten Ablaufschema zur Erstellung eines Simulationsmodells vorgegangen.

Zu Beginn wird das Ziel, welches das Konzeptmodell erfüllen soll, erläutert. Die folgende Aufgabenstellung präzisiert die Zielformulierung und ergänzt diese in Teilen. Durch diese Festlegungen ist es möglich, das Konzeptmodell zielführend zu erarbeiten.

5.1 Zielbeschreibung

Das Konzeptmodell bildet die Basis für die weitere Modellerstellung (siehe hierzu Abschnitt 4.5). Mit Simulationsmodellen die anhand dieses Konzeptmodells erstellt werden, soll es möglich sein, die Leistung eines AKLs zu analysieren. Bestandteil der Betrachtung ist zusätzlich der angeschlossene Stetigfördertechnik-Kreislauf zur Zu- und Abförderung der Behälter.

Um die optimale Leistung des AKLs zu ermitteln, müssen im Rahmen der durchzuführenden Simulationsexperimente verschiedene Parameter (siehe Abschnitt 4.1) betrachtet und variiert werden. Um die Parameter zu identifizieren, werden die Bestandteile eines AKLs (siehe hierzu Abschnitt 3.2) sukzessive auf ihre Eigenschaften untersucht und anschließend tabellarisch dargestellt.

Das erarbeitete schematische Konzeptmodell soll als Vorlage für Konzeptmodelle herangezogen werden können, die konkrete Anwendungsfälle betrachten. Die zu erarbeitende Tabelle muss daher eine Vielzahl verschiedener Ausprägungen abbilden.

Anwenden soll es möglich sein, anhand dieser Tabelle die genannten notwendigen Parameter gemäß dem zugrunde liegenden Logistiksystem mit konkreten Werten zu versehen.

5.2 Aufgabendefinition

Wie der Zielbeschreibung bereits zu entnehmen ist, liegt der Fokus der Leistungsbeurteilung auf dem AKL und der in der Vorzone eingesetzten Fördertechnik. Durch den Einsatz der diskreten ereignisorientierten Simulation soll es möglich sein, das Zusammenspiel von Behälterstetigfördertechnik, RBG und der Regalanlage abzubilden. Neben diesen physischen Bestandteilen sollen zusätzlich Faktoren wie die Anzahl der Behälter hintereinander (siehe Abschnitt 3.2) sowie die angewandte Lagerbetriebsstrategie (siehe Abschnitt 3.4) untersucht werden. Folglich soll die Modellierung des AKLs nicht als Blackbox-Ansatz verfolgt werden.

5 Entwicklung eines Konzeptmodells

Folgende physische Komponenten werden modelliert:

- Regalanlage (siehe Abschnitt 3.2)
- RBG (siehe Abschnitt 3.2)
- Stetigfördertechnik (siehe Abschnitt 3.2)
- KLT (siehe Abschnitt 3.2)

Zusätzlich wird der Lagerfüllgrad, also das Verhältnis von leeren Stellplätzen und belegten Stellplätzen (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 109) abgebildet. Um Betriebsstrategien anwenden zu können, müssen zusätzlich steuerungsrelevante Parameter abgebildet werden.

Neben der Leistungsbetrachtung des gesamten Systems sollen Messungen in speziellen Bereichen des Lagers durchgeführt werden. Hierbei handelt es sich um die folgenden Messungen:

Messung der Durchlaufzeit

Für diese Messung müssen zwei Messpunkte bestimmt werden, an denen die Anzahl der Behälter und die zugehörige Uhrzeit der Behälter aufgezeichnet werden. Durch die Differenz der Zeiten an den verschiedenen Messpunkten kann die Durchlaufzeit bestimmt werden. Um die Durchlaufzeit durch das gesamte Lager von der Einlagerung bis zur Auslagerung zu bestimmen, müssen sich die Messpunkte an der Quelle und der Senke des Logistiksystems befinden.

Dauer vom Systemeintritt bis zu den Übergabestichen zur Einlagerung

Um eine Aussage über die Auslastung der Fördertechnik geben zu können, kann die Dauer vom Systemeintritt bis zur Erreichung der Übergabepunkte gemessen werden. Hierfür müssen Messungen am Eintrittspunkt und an den einzelnen Übergabepunkten an jeder Gasse durchgeführt werden (für weitere Informationen siehe Abschnitt 3.2). Die Differenz dieser beiden Zeiten ergibt die Dauer für diesen Vorgang.

Dauer von den Übergabestichen zur Auslagerung bis zum Systemausgang

Analog zur Messung der Dauer vom Systemeintritt bis zu den Übergabestichen zur Einlagerung wird auch die Dauer von den Übergabepunkten zur Auslagerung bis zum Systemausgang gemessen. Hierfür müssen an den Übergabepunkten zur Auslagerung Messpunkte eingerichtet werden. Zusätzlich wird der Messpunkt am Systemausgang verwendet (für weitere Informationen siehe Abschnitt 3.2). Die Differenz dieser beiden Zeiten ergibt die Dauer für diesen Vorgang.

Anzahl der Fahrten in der Vorzone

Um die Anzahl der erforderlichen Durchfahrten der Behälter in der Vorzone (siehe hierzu Abschnitt 3.2) bis zur Ein- bzw. Auslagerung zu erfassen, wird ein Messpunkt eingerichtet, an dem die Behälter identifiziert werden. Um eine

Trennung zwischen Wareneingang bzw. Warenausgang zu ermöglichen, muss aus jedem Behälter hervorgehen, ob es sich um eine Ein- oder Auslagerung handelt.

Zuverlässigkeit der Auslagerungen

Ein wichtiges Ziel bei der Bereitstellung von Ware ist die rechtzeitige Bereitstellung dieser (ten Hompel, Büchter und Franzke 2007, S. 115). Je mehr Behälter zur richtigen Zeit an ihren Bestimmungsort verbracht werden, desto qualitativ hochwertiger ist die Auftragserfüllung. Um beurteilen zu können, ob ein Auftrag rechtzeitig erfüllt wurde, muss die Zeit des Auftragseingangs und die Zeit der Übergabe an den Warenausgang dokumentiert werden.

Für die Beantwortung dieser Aufgabenstellung ist das Zusammenspiel vieler Systemkomponenten zu berücksichtigen. Mit analytischen Methoden ist es möglich, die durchschnittlichen Spielzeiten eines AKLs zu berechnen und daraus die Menge der transportierten Behälter zu ermitteln. Auch die technisch mögliche Förderleistung der Behälterstetigfördertechnik kann mittels analytischer Verfahren betrachtet werden. Die Berücksichtigung von Ausfallzeiten dieser beiden Komponenten und die resultierenden Leistungseinbußen sind hingegen nicht möglich. Weiterhin können die Auswirkungen der hintereinander gelagerten Behälter und die vom LAM gleichzeitig zu transportierenden Behälter auf die Fördertechnik nicht berechnet werden. Gemäß Abschnitt 4.4 werden bei komplexen Systemen wie diesen computerbasierte Simulationsmodelle zur Analyse eingesetzt.

5.3 Systemanalyse

Nachfolgend wird eine Systemanalyse eines AKLs durchgeführt. Hierbei werden die Systemgrenzen gemäß den gesetzten Prämissen definiert. Anschließend wird ein AKL innerhalb der Systemgrenzen beschrieben. Basierend auf dieser Beschreibung werden die beteiligten Systemkomponenten analysiert und resultierende Parameter identifiziert.

5.3.1 Vereinfachende Prämissen

Ein Simulationsmodell sollte stets so genau wie nötig aber so ungenau wie möglich erstellt werden (siehe hierzu Kapitel 4). Aus diesem Grund wurden die im Folgenden entwickelten Annahmen getroffen. Das anschließende Konzeptmodell berücksichtigt diese Prämissen. Es ist jedoch ebenso möglich, diese Annahmen in Einzelfällen zu umgehen. In diesem ist jedoch zu überprüfen, ob die in Tabelle 5.1 gelisteten Komponenten erweitert werden müssen.

- **Wareneingangsprozesse**
 - Wareneingangsprozesse wie bspw. Warenannahme, Depalettierung, Qualitätskontrollen werden nicht abgebildet. Die Menge der eintreffenden KLT

5 *Entwicklung eines Konzeptmodells*

kann entweder nach festen Aufträgen erfolgen, oder es werden mittels stochastischer Abschätzungen Funktionen herangezogen, die die Schwankungen der eintreffenden KLT abbilden

- **Warenausgangsprozesse**
 - Der Warenausgang aus dem modellierten System endet mit dem Erreichen einer definierten Senke. Die Senke befindet sich kurz hinter der Ausfahrt aus dem Fördertechnikkreislauf. Alle nachfolgenden Prozesse sind kein Bestandteil dieser Betrachtung.
- **Aufbau einer Regalgasse**
 - Eine Regalgasse besteht immer aus einer linken und einer rechten Regalzeile. Zwischen den beiden Regalzeilen verfährt das RBG (siehe hierzu Abschnitt 3.2 und Abschnitt 3.2).
- **Anordnung der Übergabepplätze**
 - Die Übergabepplätze für die Ein- bzw. Auslagerung können sich entweder beide auf der gleichen Seite befinden oder aber an den gegenüberliegenden Gassenenden. Die gewählte Anordnung muss für alle Gassen gelten.
- **Anzahl der Regalbediengeräte pro Gasse**
 - Pro Gasse verfährt genau ein RBG. Ein Gassenwechsel des RBGs ist nicht vorgesehen.
- **Anzahl Lastaufnahmemittel pro Regalbediengerät**
 - An den Mast des RBGs können ein oder zwei LAM montiert werden (siehe hierzu Abschnitt 3.2). Jedes RBG wird identisch ausgestattet.
- **KLT pro Fach**
 - Es können pro Fach nur KLT mit identischen Abmessungen gelagert werden.
- **Materialien pro Fach**
 - Es können pro Fach nur identische Materialien gelagert werden.
- **Abrufmenge**
 - Da keine Kommissionierung in dem betrachteten System stattfindet, werden nur Materialien auf Behälterebene abgerufen. Die Auftragsmenge ist demnach stets ein Vielfaches der Behältermenge.
- **Einschwingphase**
 - Da es sich bei dem betrachteten System um ein nicht terminierendes System handelt, muss der Startsystemzustand definiert werden. Es wird daher angenommen, dass zu Beginn eines jeden Simulationslaufes das Lager gefüllt wird und bei einem Lagerfüllgrad von 85 % der Startzustand erreicht ist. Für weitere Informationen siehe z. B. (Gutenschwager u. a. 2017, S. 184-187)

- **Simulationslaufzeit**

- Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, müssen alle Simulationsläufe die gleiche Länge aufweisen. Um eine statistische Sicherheit zu erlangen, müssen mehrere Simulationsläufe mit mehreren Messwerten durchgeführt werden (siehe hierzu z. B. (Gutenschwager u. a. 2017, S. 187-192)

5.3.2 Systembeschreibung

Der Warentransport wird in einem AKL von Behälterfördertechnik und den RBG realisiert. Hier lässt sich das Logistiksystem in die drei Teilsysteme «Fördertechnik» und «RBG» und «Regal» unterteilen.

Die Behälterfördertechnik befindet sich in der Vorzone des AKLs und fördert die Kleinladungsträger zu den Übergabestellen. Diese befinden sich an den Gassenenden des AKLs. Je nach Artikel und gewählter Lagerbetriebsstrategie wird die optimale Gasse ausgewählt. Hier übernimmt das LAM die KLT von der Fördertechnik. Anschließend werden die Behälter zu den Einlagerorten transportiert. Um Behälter auszulagern, muss zuerst ein Auslagerauftrag vorliegen. Je nach Auslagerstrategie verfährt das RBG zu den entsprechenden Plätzen und entnimmt entsprechend des Auftrages Behälter aus dem Fach. Anschließend werden die Behälter zu den Übergabestellen transportiert und dort der Fördertechnik übergeben. Auf der Fördertechnik werden die Behälter an den Bestimmungsort gefördert.

Aus dieser Materialflussbeschreibung wird die Austauschbeziehung der beiden Teilsysteme, die an den Übergabepunkten stattfindet, deutlich.

Da die Leistung des beschriebenen Materialflusses ermittelt werden soll, befinden sich in den zu modellierenden Systemgrenzen die Fördertechnik sowie das AKL. Abbildung 5.1 stellt die gewählten Systemgrenzen graphisch dar.

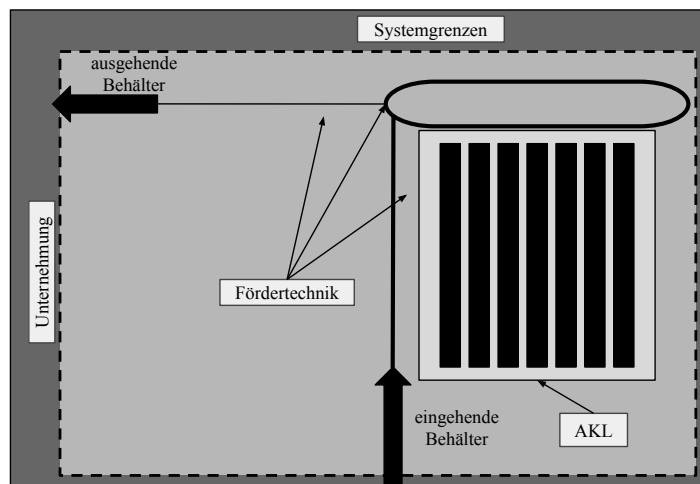


Abbildung 5.1: Systemgrenzen des Konzeptmodells (eigene Darstellung)

Weiterhin muss eine ausreichende Datenbasis zur Verfügung stehen. Hierzu gehört die Anzahl und der Zeitpunkt ein- und auszulagernder Behälter. Mit Hilfe dieser Daten wird das Simulationsmodell über eine Schnittstelle mit den Importdaten versorgt. Neben dem Import wird eine Möglichkeit zum Export der Daten vorgesehen, durch die eine Aufbereitung der erhaltenen Daten ermöglicht werden soll.

5.3.3 Spezifizierung der physischen Modellkomponenten

Nachfolgend werden die in Abschnitt 5.2 genannten Modellkomponenten spezifiziert. Neben der Beschreibung findet auch eine Erläuterung zu den gewählten Entscheidungen statt. Anschließend werden die Modellkomponenten tabellarisch dargestellt.

Regal

Um das Regal abzubilden, müssen die Fachabmessungen definiert werden. Hierzu wird die Länge, Breite und die Höhe des Faches benötigt. Eine Höhe ist notwendig, da bei unterschiedlich hohen Ladungsträgern Restriktionen hinsichtlich der Fachzuordnung auftreten. Besitzen alle verwendeten KLT die selbe Höhe, müssen die Fachhöhen nicht abgebildet werden.

Sofern die Fahrzeiten exakt berechnet werden, müssen die Abstände zwischen den Fächern in x- und y-Richtung (siehe hierzu Abschnitt 3.2) bekannt sein. Gemäß den zuvor festgelegten Abmessungen der Regalanlage werden die Regalelemente in x-Richtung angeordnet. Die Breite des Bediengangs ist für diese Modellierung nicht von Bedeutung, da sich dieser nicht direkt auf die Leistung der RBG auswirkt und somit nicht modelliert werden muss. Sollten unterschiedliche Verhaltensweisen hinsichtlich der Fahreigenschaften vorhanden sein, können diese bei der Modellierung des RBGs berücksichtigt werden (siehe hierzu Abschnitt 5.3.3). Für die Modellierung der Regalanlage ist zusätzlich die Anzahl der Gassen relevant, in dessen Bediengang jeweils ein RBG verfährt (siehe Unterabschnitt 5.3.1).

Kleinladungsträger

Zur Modellierung der Kleinladungsträger müssen die Abmessungen für jeden Typ von verwendeten KLT abgebildet werden. Die notwendigen Abmessungen sind Länge, Breite und Höhe. Es ist darauf zu achten, dass für KLT und Regal einheitliche Maßeinheiten verwendet werden.

Regalbediengeräte

Die RBG übernehmen eine essentielle Aufgabe innerhalb des betrachteten Lagersystems. Durch die RBG wird es möglich, dass die Behälter automatisiert ein- bzw. ausgelagert werden (siehe Abschnitt 3.2).

Zur Modellierung der RBG gibt es zwei verschiedene Ansätze. Zum kann ein Blackbox-Ansatz gewählt werden, bei dem errechnete durchschnittliche Spielzeiten

5 Entwicklung eines Konzeptmodells

verwendet werden. Steht die Berechnung der Leistung, unabhängig von der verwendeten Betriebsstrategie im Vordergrund, ist dieser Ansatz ausreichend. Bei der Berechnung der durchschnittlichen Spielzeiten werden repräsentative Punkte als Anfahrpunkte gewählt, die im Mittel der tatsächlichen Leistung nahe kommen (siehe Abschnitt 3.3).

Sollen hingegen die Lagerbetriebsstrategien berücksichtigt werden, ist es im Hinblick auf die Genauigkeit sinnvoll, die genauen Fahrbewegungen zu modellieren. Wird bspw. die ABC-Zonung angewendet (siehe Abschnitt 3.4.1), können je nach Auftragsaufkommen verschiedene Spielzeiten resultieren. Müssen für einen Auftrag bspw. lediglich A-Artikel ausgelagert werden, ist die Fahrzeit von den Übergabepunkten zu den entsprechenden Fächern geringer als zu C-Artikeln, da A-Artikel näher an den Übergabepunkten lagern als C-Artikel (siehe Abschnitt 3.4.1).

Um die Fahreigenschaften abzubilden, müssen die Beschleunigungen, Verzögerungen und die Geschwindigkeit in x- und y-Richtung abgebildet werden.

Zusätzlich zu den Fahrzeiten müssen noch die Zeiten für die exakte Positionierung des RBGs hinzugerechnet werden.

Da für dieses Konzeptmodell ebenfalls die Betriebsstrategien von Bedeutung sind, werden die Fahrzeiten berechnet und es wird auf die Berechnung der durchschnittlichen Spielzeit verzichtet.

Lastaufnahmemittel

Zur Modellierung des LAMs können wie bei der Modellierung des RBGs ebenfalls zwei Ansätze gewählt werden. So können die Zeiten für die Lastauf- bzw. abnahme bei jeder Aktion des LAMs berechnet werden, oder diese Zeiten bereits im Vorfeld berechnet und dem Modell übergeben werden.

Im Hinblick auf die aufzuwendende Rechenleistung bietet es sich an, diese Zeiten im Vorfeld zu berechnen und dem LAM zu übergeben, da sich diese Zeiten bei gleich großen und in der selben Anzahl aufzunehmender oder abzugebender KLT identisch sind. Zudem muss eine Option vorgesehen werden, die es während der Simulation ermöglicht, dass die richtigen Zeiten, je vorliegendem Fall, ausgewählt werden.

In diesem Konzeptmodell wird werden diese Zeiten im Vorfeld berechnet und dem LAM als Parameter übergeben, weshalb nicht weiter auf die Berechnung der Lastauf- bzw. abnahme eingegangen wird.

Behälterfördertechnik

Zur Modellierung der Behälterfördertechnik muss die Fördergeschwindigkeit und die Beschleunigung der Fördertechnik angegeben werden. Da die Fördertechnikbreite keinen Einfluss auf die Leistung des Systems hat, wird diese nicht modelliert. Darüber hinaus muss die Kapazität der Fördertechnik angegeben werden (siehe Abschnitt 3.2). In diesem Zuge muss auch die Länge der einzelnen Elemente bzw. die Gesamtlänge der Fördertechnik eingestellt werden.

Neben der Fördertechnik müssen auch die Umsetzer modelliert werden, indem die Anzahl der KLT, die pro Stunde umgesetzt werden können, angegeben wird.

5.3.4 Spezifizierung der steuerungsrelevanten Modellkomponenten

Nachdem die physischen Modellkomponenten beschrieben wurden, werden nun die steuerungsrelevanten Komponenten beschrieben. Durch diese wird es möglich, die anfallenden Aufträge sowie Lagerbetriebsstrategien anzuwenden.

Kleinladungsträger

Zur Umsetzung der Lagerbetriebsstrategien (siehe Abschnitt 3.4) muss eine Verbindung zwischen dem Kleinladungsträger und dem Material hergestellt werden, da die Aufträge stets Material abrufen, jedoch keine spezifischen Behälter. Da sowohl die Behälterstetigfördertechnik, die RBG, das LAMs und auch die Regalanlage auf der Behälter-Ebene arbeiten, fungiert das Material als ein Steuerungsparameter.

Zu lagernde Materialien

Zu lagerndes Material wird in einem AKL in Kleinladungsträgern gelagert (siehe Kapitel 3). Die Materialeigenschaften werden daher als Steuerungsinformationen an die Kleinladungsträger übergeben. Folgende Informationen sind dabei relevant:

- Materialnummer
- Klassifizierung (A-, B- oder C-Artikel)
- Menge pro KLT
- Gewicht
- evtl. Zusammenlagerverbote

Bei der Befüllung des Lagers zu Beginn sowie bei anfallenden Einlagerungen müssen die Materialien mit den Kleinladungsträgern verknüpft werden.

Ein- bzw. Auslageraufträge

Wie bereits bei der Aufgabendefinition in Abschnitt 5.2 beschrieben, sollen als Datengrundlage Ein- bzw. Auslageraufträge vorliegen. Ein Bestandteil von Aufträgen sind die benötigten Materialien in Art und Menge. Da eine Verknüpfung der Materialien mit dem Kleinladungsträger stattgefunden hat, können die Auslageraufträge basierend auf dem Lagerbestand durchgeführt werden. Für Einlageraufträge werden bereits im Vorfeld die Materialien mit den Kleinladungsträgern verknüpft und alle notwendigen Informationen übergeben.

Neben diesen Informationen müssen noch Bereitstellungszeiten angegeben werden, damit die Bearbeitung dementsprechend erfolgen kann.

5 Entwicklung eines Konzeptmodells

Da die Anzahl oder die Ausprägungen der Aufträge hinsichtlich der zu liefernden Materialien stark variieren können, ist es ratsam, neben starren Auftragslisten stochastische Funktionen zu verwenden, um Schwankungen abbilden zu können (Gutenschwager u. a. 2017, S. 85).

Wird bspw. eine Zonung als Lagerbetriebsstrategie Abschnitt 3.4.1 angewendet, können Aufträge hinsichtlich der Anzahl von A-, B-, oder C-Artikel untersucht werden. Diese Verteilung kann auf Streuungen untersucht werden und gemäß der auftretenden Schwankungen als stochastische Funktion an das Modell übergeben werden.

Lagerbetriebsstrategien

Um die Leistung unter bestimmten Lagerbetriebsstrategien zu testen, müssen die zu testenden Strategien im Modell umgesetzt werden. Hierfür müssen im Vorfeld alle relevanten Steuerungsparameter identifiziert und anschließend als Informationen den KLT, Materialien etc. übergeben werden (siehe hierzu Abschnitt 5.3.4). Nachfolgend sind einige zu implementierende Lagerbetriebsstrategien sowie die wichtigsten Steuerungsparameter zur Umsetzung dieser genannt.

- Zonung
 - Klassifizierung (A-, B- oder C-Artikel)
- Gassenquerverteilung
 - Lagerort des Materials
 - Menge je Lagerort
- FiFo
 - Einlagerdatum
- Restmengenbevorzugung
 - Materialmenge je KLT

Diese Liste kann beliebig erweitert werden. Je nach behandeltem Kontext können unterschiedliche Strategien bevorzugt werden (siehe hierzu Abschnitt 3.4).

Regalanlage

Als Grundlage für die Betriebsstrategien muss bekannt sein, auf welchem Lagerplatz und in welcher Menge die Materialien lagern. Hierfür muss ein stets aktueller Lagerbestand verfügbar sein. Zusätzlich müssen die jeweiligen Status der Fächer (gesperrt, reserviert, verfügbar) vermerkt werden. Zusätzlich muss die maximale Behälterkapazität für jedes Fach hinterlegt werden.

Neben Restriktionen in der Höhe müssen zusätzlich die maximal zulässigen Fach- und Feldlasten eingehalten werden (siehe Abschnitt 3.2). Werden Materialien respektive KLT in ein Fach eingelagert, müssen die maximal zulässigen Fach- und Feldlasten um dieses Gewicht reduziert werden. Die daraus resultierenden neuen

Fach- und Feldlasten müssen vermerkt werden und für die folgenden Einlagerungen muss dieser neue Wert berücksichtigt werden. Werden KLT ausgelagert, müssen die Fach- und Feldlasten dementsprechend wieder erhöht werden. Dieser Wert kann zusätzlich verwendet werden, um eine gleichmäßige Belastung der Regalanlage zu gewährleisten. Für jede KLT-Größe (siehe Abschnitt 3.2) wird ein Parameterwert übergeben, mit dem die Lagertiefe individuell abgebildet werden kann.

Regalbediengerät

Da ein RBG technischen Störungen unterliegen kann, die zu Ausfällen führen können, muss dieses Verhalten ermittelt und als stochastische Größe bei der Modellerstellung berücksichtigt werden. Zu erfassende Werte können hierfür z.B. die mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (MTBF- mean time between failures) oder die mittlere Reparaturzeit (MTTR- mean time to repair) sein (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 195).

Lastaufnahmemittel

Neben diesen Parametern muss auch die Kapazität des LAMs, also die maximal mögliche Anzahl an KLT, angegeben werden (siehe Abschnitt 3.2). Die Kapazität kann je nach Größe der KLT variieren. Neben der Kapazität muss eine Zählvariable verwendet werden, die die Anzahl der KLT auf dem LAM angibt. Die Obergrenze wird durch die Kapazitätsgrenze bestimmt. Kann im Rahmen der Modellierung allerdings nur ein KLT pro LAM transportiert werden, entfällt diese Variable und es muss stattdessen die Status «frei» oder «belegt» angegeben werden.

Je nach benötigter Leistung können bis zu zwei LAM pro RBG montiert werden (siehe Unterabschnitt 5.3.1).

Werden zwei LAM verwendet, können zwei Auslageraufträge pro Fahrt des RBGs bearbeitet werden. Die Aufträge müssen im Vorfeld nicht mehr nur einem speziellen RBG bzw. einer Gasse zugeordnet werden, sondern auch dem entsprechenden LAM, da das untere LAM von dem oberen LAM bzw. das obere von dem unteren beschränkt wird. Das untere LAM ist daher primär für die unteren Fächer zuständig und das obere LAM für die oberen Fächer. Zur Umsetzung muss angegeben werden, welches LAM auf welches Fach hauptsächlich zugreifen soll.

Wird hingegen ein LAM verwendet, ist diese Zuordnung nicht notwendig, da alle Fächer von diesem einen LAM bedient werden.

Da ein LAM ebenso technischen Störungen unterliegen kann, wie ein RBG, muss dieses Verhalten ebenfalls ermittelt und als stochastische Größe bei der Modellerstellung berücksichtigt werden. Zu erfassende Werte können hierfür z.B. die mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (MTBF- mean time between failures) oder die mittlere Reparaturzeit (MTTR- mean time to repair) (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 195) sein.

Behälterstetigfördertechnik

Die KLT fahren hintereinander auf der Fördertechnik. Daraus resultiert eine Kapazität je Fördertechnikabschnitt, die ebenfalls im Modell angegeben werden muss. Die Behälterfördertechnik kann ebenfalls durch technische Störungen ausfallen. Aus diesen Grund müssen auch hier die relevanten Werte erfasst werden. Wie bereits beschrieben, können hierfür bspw. die mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (MTBF- mean time between failures) oder die mittlere Reparaturzeit (MTTR- mean time to repair) (ten Hompel und Heidenblut 2011, S. 195) herangezogen werden.

5.3.5 Übersicht über die zu modellierenden Komponenten und deren Parameter

Die in dem vorherigen Abschnitt genannten Komponenten sowie deren Parameter werden nachfolgend tabellarisch aufbereitet. Mit Hilfe dieser Tabelle (siehe S. 55) ist es möglich, ein AKL, gemäß den getroffenen Prämissen, konzeptuell zu modellieren.

Tabelle 5.1: Übersicht über die zu modellierenden Komponenten und deren Parameter

Komponenten	Physische Eigenschaften	Steuerungsparameter
Regalanlage	<ul style="list-style-type: none"> - Gesamtlänge L - Gesamtbreite B - Höhe H - Gassenanzahl G - Elementabmessungen (l x b x h) 	<ul style="list-style-type: none"> - Koordinaten des Fachs - Bestand inkl. Ort - Status des Fachs - Anzahl der max. KLT je Fach - Status der Gasse
KLT	<ul style="list-style-type: none"> - Abmessungen (l x b x h) 	<ul style="list-style-type: none"> Gewicht - Material - Klassifizierung (ABC) - transportierte Materialmenge
Regalbediengerät	<ul style="list-style-type: none"> - v_x - v_y - a_x - a_y - Positionierungszeit t_{pos} - Anzahl RBG 	<ul style="list-style-type: none"> - Status - MTBF - MTTR
Lastaufnahmemittel	<ul style="list-style-type: none"> - \emptyset Spielzeit für Aufnahme und Abgabe 	<ul style="list-style-type: none"> - Status - Anzahl geladener KLT - MTBF - MTTR - Kapazität
Fördertechnik	<ul style="list-style-type: none"> - Geschwindigkeit - Beschleunigung - Länge - Leistung Umsetzer 	<ul style="list-style-type: none"> - Kapazität - Status - MTBF - MTTR
Aufträge		<ul style="list-style-type: none"> - Uhrzeit - benötigte Menge

6 Validierung des Konzeptmodells an einem Fallbeispiel

In diesem Kapitel wird das zuvor entwickelte Konzeptmodell auf ein mögliches Fallbeispiel angewendet. Für ein besseres Verständnis dieses Logistiksystems werden die Funktion sowie die vorhandenen Komponenten näher beschrieben.

Dieses Fallbeispiel steht exemplarisch für ein AKL im Bereich der Automobilproduktion. Zusätzlich dient dieses reale System der Validierung des in Kapitel 5 erarbeiteten Konzeptmodells.

6.1 Aufgaben des Logistiksystems

Das AKL ist für die Versorgung mehrerer Montagelinien bei einem deutschen Automobilhersteller zuständig. Hier werden Materialien, die nicht just-in-time bzw. just-in-sequence angeliefert werden, gelagert.

6.2 Systembeschreibung

Das betrachtete Logistiksystem besteht aus automatischen und manuellen Komponenten. Sofern möglich, werden automatisierte Komponenten eingesetzt. Prozessschritte, die automatisiert realisiert wurden, sind das Fördern der Behälter, die Depalettierung sowie die Bedienung des Lagers und der Warenausgangspuffer. Die Entladung der LKW, das Umpacken in AKL-fähige Behälter sowie die Behandlung von Störfällen erfolgt manuell durch Mitarbeiter. Nachfolgend wird der schematische Materialfluss von der Anlieferung der Materialien bis zur Verladung der Leerbehälter erläutert.

Das Logistiksystem befindet sich auf dem Gelände eines OEM. In Abbildung 6.1 sind schematisch die einzelnen Komponenten des Systems sowie der dazugehörige Materialfluss zu erkennen.

Grundsätzlich werden Großladungsträger angeliefert. Bei dem Grundladungsträger handelt es sich um Paletten. Auf diesen Paletten werden die KLT gestapelt transportiert. Im Rahmen der Anlieferung werden die Großladungsträger seitlich von den Sattelzügen entladen und auf einer Wareneingangsfläche gepuffert. In diesem Zusammenhang wird eine Wareneingangsprüfung durchgeführt, bei der sowohl die Menge als auch die Qualität der gelieferten Artikel überprüft werden. Bei Unterschieden zwischen den Anlieferungsbelegen und der tatsächlich gelieferten Menge werden die betreffenden Anlieferungsgebände auf eine Sperrfläche zur weiteren Bearbeitung transportiert. Werden keine Fehler bei der Wareneingangsprüfung erkannt, werden

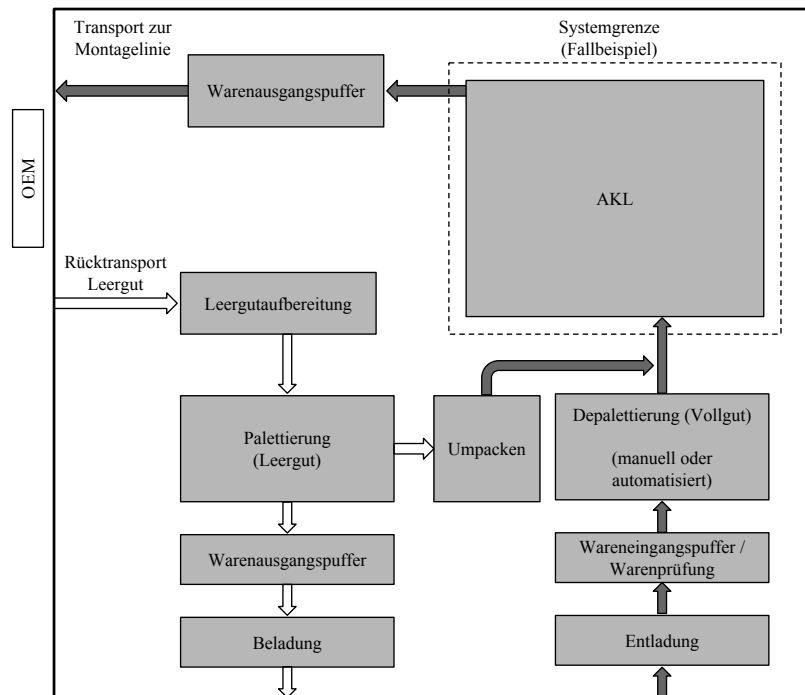


Abbildung 6.1: Materialfluss im Fallbeispiel (eigene Darstellung)

die Großladungsträger zum nächsten Prozessschritt gebracht. Handelt es sich um eine Anlieferung von VDA-KLT-Gebinden, werden diese vor der Einlagerung in das AKL automatisch von einem Roboter depalettiert. Sollte bei dem Depalettierroboter eine technische Störung vorliegen, sodass dieser nicht einsatzbereit ist, werden die KLT-Gebinde von Mitarbeitern an speziellen Depalettierarbeitsplätzen vereinzelt und auf die Fördertechnik aufgestellt. Werden Artikel in nicht-AKL-fähigen Gebinden (vgl. Abschnitt 3.2) geliefert, werden diese manuell aus dem Anlieferungsgebände (hierbei handelt es sich um große Kartons auf einer Euro-Palette als Grundladungsträger) entnommen und manuell in die entsprechenden KLT umgepackt. Die KLT werden anschließend auf die Behälterfördertechnik aufgesetzt.

Bevor die KLT eingelagert werden, findet eine Prüfung der KLT auf Gewicht, Abmessungen oder etwaige Überstände von Material oder Identifikationsetiketten statt. Sind bei dieser Prüfung keine Fehler aufgetreten, werden die KLT zur endgültigen Einlagerung transportiert. Werden hingegen Fehler erkannt, werden die KLT zu einem Nachbearbeitungsplatz gefördert, an welchem die Fehler von einem Mitarbeiter behoben werden. Anschließend findet eine weitere Überprüfung statt und der KLT wird weiter zur Einlagerung gefördert.

Im Rahmen der Einlagerung wird den KLT anhand der gewählten Lagerbe-

triebsstrategien eine der zehn Lagergassen sowie ein Lagerplatz zugewiesen. Als Lagerbetriebsstrategien werden die Zonung sowie die Gassenquerverteilung eingesetzt (siehe Abschnitt 3.4). Mittels die eingesetzte Fördertechnik wird der KLT zu dem Übergabestich der zugeteilten Gasse transportiert. Das Regalbediengerät übernimmt den oder die KLT und lagert diese(n) am zugeteilten Lagerplatz ein.

Liegen Auslageraufträge vor, übernimmt das Regalbediengerät die KLT aus dem Regal und transportiert diese zu den Übergabestichen der Fördertechnik für die Auslagerung. Anschließend werden die KLT zu einem Zwischenpuffer gefördert. In diesem Zwischenpuffer werden die KLT vorgehalten, um zeitnah automatisch in spezielle KLT-Gestelle ausgelagert zu werden. In den KLT-Gestellen werden die KLT mittels Routenzügen an die Montagelinie transportiert. Die Beladung der Routenzüge erfolgt an dafür eingerichteten Routenzugbahnhöfen. An dem entsprechenden Verbauort entnehmen die Mitarbeiter die benötigten Materialien direkt aus den KLT.

Da sich die verwendeten Behälter in einem Kreislauf befinden, müssen die leeren KLT wieder an die Lieferanten zurückgeschickt werden. Hierfür tauscht der Mitarbeiter des Routenzuges die leeren Gestelle mit den vollen Gestellen aus und transportiert diese in den Leergutbereich des Lagersystems. Hier werden die Label sowie Schmutzrückstände von den Behältern entfernt. Um den Transport möglichst effizient zu gestalten, werden die KLT anschließend sortenrein auf entsprechenden Paletten gemäß des optimalen Schichtmusters gestapelt und gesichert.

Abschließend werden die Leergutgebände verladen und an die Lieferanten zurückgeführt oder diese leeren KLT werden zu den manuellen Umpackplätzen transportiert und werden an diesen mit Materialien gefüllt.

6.3 Prämissen und Systemgrenzen

Gemäß der Prämissen werden die Warenein- und ausgangsprozesse nicht abgebildet. Die in diesem Fallbeispiel anfallenden Umpackprozesse sowie etwaiges manuelles depalettieren werden nicht modelliert. Ebenso wird der Depalettierroboter nicht modelliert. Diese drei Prozesse werden jedoch zu einem Materialstrom zusammengefasst, der das Modell mit einzulagernden Behältern versorgt. Hierzu müssen die Leistungen der einzelnen Gewerke sowie die Ausfallzeiten als Blackboxansatz abgebildet werden.

Die realisierten Warenausgangspuffer sowie die Routenzugverkehre werden gemäß den Prämissen nicht abgebildet. Hierzu wird eine Senke definiert, die sich kurz vor den Warenausgangspuffern befindet.

Diese Prämissen bilden das Fallbeispiel ab und decken sich mit den beschriebenen Systemsgrenzen. Abbildung 6.1 zeigt die resultierenden Systemsgrenzen.

6.4 Modellkomponenten

Gemäß der dargestellten Tabelle in Unterabschnitt 5.3.5 wird nachfolgend diese Tabelle mit den Parametern des beschriebenen Fallbeispiels gefüllt. Für einige der Komponenten und deren Parameter lagen zum Zeitpunkt der Erstellung keine Daten

6 Validierung des Konzeptmodells an einem Fallbeispiel

vor. In diesem Fall «zu beschaffen» geschrieben, da es diese Daten im Rahmen der Datenbeschaffung (vgl. Abbildung 4.5) noch zu beschaffen gilt. Parameter, die sich während der Laufzeit des Modells ändern können, wie bspw. der Status eines Faches (siehe Abschnitt 3.4), werden mit «individuell» gekennzeichnet.

Um eine bessere Übersicht zu erhalten, wurde die Tabelle 5.1 für die physischen sowie steuerungsrelevanten Parameter separat erstellt.

Tabelle 6.1: Übersicht über die zu modellierenden physischen Komponenten und deren Parameter

Komponenten	Physische Eigenschaften	Werte	
Regalanlage	- Gesamtlänge L	40.000 mm	
	- Gesamtbreite B	50.000 mm	
	- Höhe H	18.000 mm	
	- Gassenanzahl G	10	
	- Elementabmessungen (l x b)	2.700 x 1.400 mm	
KLT	- Abmessungen (l x b x h)	600 x 400 x 147 mm 400 x 300 x 147 mm 300 x 200 x 147 mm	
	Regalbediengerät	- v_x	3,4 m/s
		- v_y	2,0 m/s
- a_x		2,7 m/s ²	
- a_y		3,0 m/s ²	
- Positionierungszeit t_{pos}		zu beschaffen	
- Anzahl RBG		10	
Lastaufnahmemittel	- Ø Spielzeit je KLT-Konstellation	zu beschaffen	
Fördertechnik	- Geschwindigkeit	0,82 m/s	
	- Beschleunigung	2,0 m/s ²	
	- Länge	zu beschaffen	
	- Leistung Umsetzer	zu beschaffen	

Tabelle 6.2: Übersicht über die zu modellierenden steuerungsrelevanten Komponenten und deren Parameter

Komponenten	Steuerungsparameter	Werte
Regalanlage	- Koordinaten des Fachs	individuell
	- Bestand inkl. Ort	individuell
	- Status des Fachs	individuell
	- Anzahl der max. KLT je Fach	600 x 400 x 147 mm : 12 KLT 300 x 400 x 147 mm : 25 KLT 300 x 200 x 147 mm : 50 KLT
KLT	- Gewicht	individuell
	- Material	individuell
	- Klassifizierung (ABC)	individuell
	- transportierte Materialmenge	individuell
Regalbediengerät	- Status	individuell
	- MTBF	zu beschaffen
	- MTTR	zu beschaffen
Lastaufnahmemittel	- Ø Spielzeit je KLT-Konstellation	individuell und zu beschaffen
	- Anzahl geladener KLT	individuell
	- MTBF	zu beschaffen
	- MTTR	zu beschaffen
	- Kapazität	zu beschaffen
Fördertechnik	- Kapazität	individuell
	- Status	individuell
	- MTBF	zu beschaffen
	- MTTR	zu beschaffen
Aufträge	- Uhrzeit	individuell
	- benötigte Menge	individuell

7 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgabe dieser Arbeit war die Erstellung eines Konzeptmodells zur Leistungsanalyse automatischer Kleinteilelager im Kontext der Automobilindustrie.

Für die Beantwortung dieser Fragestellung erfolgte zuerst eine Einführung zu den Grundlagen der Automobilproduktion, der Technik von AKL sowie zu den Grundlagen der Simulation. Anschliessend wurde, basierend auf den zuvor vermittelten Grundlagen, das Konzeptmodell entwickelt, welches abschliessend an einem Fallbeispiel validiert wurde.

Die Automobilindustrie stellt, mit seiner grossen Anzahl an Zulieferern und den daraus resultierenden Abhängigkeiten für die Werksversorgung, hohe Anforderungen an die Logistik. So müssen, neben der Versorgung der Werke, auch die Materialien innerhalb der Werke taktgenau an die Montagelinie geliefert werden. Zur Umsetzung dieser Aufgaben wurde eine Vielzahl von Prozessen entwickelt, die die Umsetzung ermöglichen.

Eng mit der Automobilproduktion sind daher die Begriffe «Just-in-time» und «just-in-sequence», für die verbrauchssynchrone Bereitstellung, verbunden. Aber auch Konzepte wie Routenzugverkehre oder die Kommissionierung in Supermärkten sind typisch für die Automobilindustrie. Werden Materialien nicht produktionssynchron angeliefert, hat sich für kleinteilige Ware die Lagerung in AKL etabliert.

Für den Betrieb von AKL werden Lagerbetriebsstrategien eingesetzt, die die Umsetzung der Ein- bzw. Auslagerung gemäss den strategieeigenen Anforderungen umsetzen. In dieser Arbeit wurde zu diesem Thema eine Bewertung von Lagerbetriebsstrategien im Kontext der Automobilindustrie durchgeführt. Im Zuge dieser Betrachtung wurde deutlich, dass die Sicherstellung der Montageversorgung beim Betrieb von logistischen Systemen eine entscheidende Rolle spielt. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, ist der Einsatz von redundanten Systemen zu bevorzugen, durch die es möglich wird, auch bei Ausfall von Teilsystemen die Bereitstellung von Materialien umzusetzen. Neben mehrfachvorhandenen technischen Systemen müssen auch die Lagerbetriebsstrategien die geforderte Redundanz umsetzen. Hierfür wurde die Gassenquerverteilung, bei der die Materialien gleichmässig über alle Gassen verteilt werden, als geeignete Strategie identifiziert. Neben dieser Strategie wird es durch die Vorlaufzeitadaption möglich, Auftragsspitzen durch die frühere Bearbeitung zu glätten und somit die Auslastung der Gassen zu reduzieren.

Die Erarbeitung eines Konzeptmodells liefert als Ergebnis eine Vorlage, mit der es Anwendern möglich ist, durch sukzessives abarbeiten der zu betrachtenden Komponenten, ein passendes Konzeptmodell für das betrachtete AKL zu erstellen. Neben den physischen Parametern der einzelnen Komponenten sind ebenso steuerungsrelevante Merkmale enthalten, mit denen die Umsetzung von Lagerbetriebsstrategien möglich

7 Zusammenfassung und Ausblick

wird.

Das entwickelte Konzeptmodell wurde auf ein reales Fallbeispiel angewendet und validiert. Es war mit dieser Vorlage möglich, das vollständige System, unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Prämissen, konzeptuell zu modellieren.

Bei zukünftigen Bearbeitungen könnten die getroffenen Prämissen so verändert werden, dass das Konzeptmodell ebenfalls für automatische Hochregallager anwendbar ist. Für die Durchführung von Simulationsexperimenten zur Leistungsanalyse kann dieses Konzeptmodell als Basis dienen. Ein Konzeptmodell muss hierfür formalisiert und programmiert werden.

Die Bewertung der Lagerbetriebsstrategien fand in dieser Arbeit lediglich unter der Berücksichtigung von der Stellung der Logistik statt. Um eine Bewertung dieser Strategien unter dem Gesichtspunkt der tatsächlich zu realisierenden Leistung, je nach Ausprägung der zu definierenden Parameter, zu ermöglichen, können ebenfalls Simulationsexperimente durchgeführt werden. Auch hierfür eignet sich die Vorlage des Konzeptmodells.

Literaturverzeichnis

- Arnold, D. und K. Furmans (2009). *Materialfluss in Logistiksystemen*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation (1997). "Simulation in Produktion und Logistik". In: *ASIM-Mitteilungen* 7a.
- Baron, C.P. u. a. (2001). "Handlungsanleitung Simulation". In: *Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik*. Hrsg. von M. Rabe und B. Hellingrath. SCS International, S. 117–150.
- Barot, M. und J. Hromkovič (2017). *Stochastik Diskrete Wahrscheinlichkeit und Kombinatorik*. Zürich: Birkhäuser Springer International Publishing AG.
- Bichler, K. u. a. (2011). *Beschaffungs- und Lagerwirtschaft - Praxisorientierte Darstellung der Grundlagen, Technologien und Verfahren*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Brandes, T. (1997). *Betriebsstrategien für Materialflusssysteme unter besonderer Berücksichtigung automatisierter Lager*. Aachen: Shaker Verlag.
- Brunner, F.J. (2017). *Japanische Erfolgskonzepte*. München: Carl Hanser Verlag München.
- Daniluk, D. und R. Chizu (2010). "Simulation und Emulation im Internet der Dinge". In: *Internet der Dinge in der Intralogistik*. Hrsg. von M. ten Hompel und G. Willibald. Springer-Verlag, S. 149–167.
- Dewitz, M. u. a. (2012). *Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport - Ergebnisse einer Studie*. Techn. Ber. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) Technische Universität München.
- DIN IEC 60050-351 (2014). *DIN IEC 60050-351 Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch: Teil 351: Leittechnik*. Beuth, Berlin.
- Eley, M. (2012). *Simulation in der Logistik - Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Federation Europeenne de la Manutention Sektion IX (2003). "FEM 9.851 Leistungsnachweis für Regalbediengeräte Spielzeiten". In: *Federation Europeenne de la Manutention Sektion IX*.
- Fröming, J. (2009). *Ein Konzept zur Simulation wissensintensiver Aktivitäten in Geschäftsprozessen*. GITO. URL: <https://books.google.de/books?id=WgQyRI9mgG8C>.
- Großeschallau, W. (1984). *Materialflußrechnung Modelle und Verfahren zur Analyse und Berechnung von Materialflußsystemen*. Hrsg. von R. Jünemann und H.-Ch. Pfohl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo.
- Gudehus, T. (2010). *Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.

- Günter, P. (2006). "Eine Branche entdeckt ihre Potentiale". In: *Intralogistik - Potentiale, Perspektiven, Prognosen*. Hrsg. von D. Arnold. Springer-Verlag, S. 5–16.
- Gutenschwager, K. u. a. (2017). *Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Heiserich, O. E., K. Helbig und W. Ullmann (2011). *Logistik - Eine praxisorientierte Einführung*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Henze, N. (2017). *Stochastik für Einsteiger - Eine Einführung in die faszinierende Welt des Zufalls*. Wiesbaden: Springer Spektrum.
- Hüttenrauch, M. und M. Baum (2007). *Effiziente Vielfalt - Die dritte Revolution in der Automobilindustrie*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Klug, F. (2010). *Logistikmanagement in der Automobilindustrie - Grundlagen der Logistik im Automobilbau*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Koether, R. (2007). *Technische Logistik*. Carl Hanser Verlag München.
- Mattern, F. und H. Mehl (1989). "Diskrete Simulation - Prinzipien und Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung". In: *Informatik Spektrum* 12, S. 198–210.
- Oser, J. (2008). "Kleinteilelager". In: *Handbuch Logistik*. Hrsg. von D. Arnold u. a. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 660–668.
- Rabe, M. (1998). "Einführung". In: *Simulation in Produktion und Logistik*. Hrsg. von M. Kuhn A.; Rabe. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 1–10.
- Rabe, M., S. Spieckermann und S. Wenzel (2008). *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik - Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media.
- ten Hompel, M., H. Büchter und U. Franzke (2007). *Identifikationssysteme und Automatisierung*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- ten Hompel, M. und V. Heidenblut (2011). *Taschenlexikon Logistik - Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- ten Hompel, M., V. Sadowsky und M. Beck (2011). *Kommissionierung - Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- ten Hompel, M. und T. Schmidt (2010). *Warehouse Management - Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- ten Hompel, M., T. Schmidt und L. Nagel (2007). *Materialflusssysteme - Förder- und Lagertechnik*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Thomas, F. (2008). "Lagersysteme". In: *Handbuch Logistik*. Hrsg. von D. Arnold u. a. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 645–660.
- Trojan, A. (2007). "... und die Auswirkungen auf den 1st - Tier - Lieferanten". In: *Logistik in der Automobilindustrie - Innovatives Supply Chain Management für wettbewerbsfähige Zulieferstrukturen*. Hrsg. von F. Gehr und B. Hellingrath. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, S. 1–18.
- Urban, G. (2007). "Das ganze Zuliefernetzwerk im Griff - Innovations- und Effizienzpotenziale nutzen". In: *Logistik in der Automobilindustrie - Innovatives Supply*

- Chain Management für wettbewerbsfähige Zulieferstrukturen*. Hrsg. von F. Gehr und B. Hellingrath. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, S. 1–18.
- Vahrenkamp, R. und H. Kotzab (2012). *Logistik - Management und Strategien*. 7. Aufl. Berlin: Oldenbourg Verlag München.
- Verband der Automobilindustrie VDA (2015). “VDA 4500 - Kleinladungsträger (KLT)-System Teil 1 (Technische Empfehlung)”. In: *VDA-Empfehlungen*.
- Verein Deutscher Ingenieure (1970). “VDI-Richtlinie 2411: Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen”. In: *VDI-Richtlinien*.
- (1973). “VDI-Richtlinie 3561: Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen”. In: *VDI-Richtlinien*.
 - (1994). “VDI 2690 - Blatt 1 - Material- und Datenfluß im Bereich von automatisierten Hochregallagern - Grundlagen”. In: *VDI-Richtlinien*.
- Verein Deutscher Ingenieure VDI (2014). “VDI-Richtlinie 3633: Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen - Grundlagen”. In: *VDI-Richtlinien*.